



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
Facultad de Tecnología de la Construcción

Monografía

**EVALUACIÓN HIDROTÉCNICA DEL PUENTE BOAQUITO EN LA COMARCA
BOAQUITO, BOACO**

Para optar al título de ingeniero civil

Elaborado por

Br. Allan Javier Hernández Vega
Br. Erick Mauricio Rivas Albuquerque

Tutor

Dr. Ing. Nestor Javier Lanzas Mejía

Managua, Julio 2017



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCION
DECANATURA

DEC-FTC-REF-No.508
Managua, agosto 20 del 2013

Bachilleres
ALLAN JAVIER HERNANDEZ VEGA
ERICK MAURICIO RIVAS ALBUQUERQUE
Presente

Estimados Bachilleres:

Es de mi agrado informarles que el PROTOCOLO de su Tema monográfico titulado "EVALUACION HIDROTECNICA DEL PUENTE "BOAQUITO" EN LA COMARCA BOAQUITO, BOACO " ha sido aprobado por esta Decanatura.

Así mismo les comunico estar totalmente de acuerdo, de que el Dr.Ing. NESTOR LANZA MEJIA, sea el tutor de su trabajo final.

La fecha limite, para que presenten concluido su documento, debidamente revisado por el tutor guía será el 28 febrero del 2014.

Esperando puntualidad en la entrega de la Tesis, me despido.

Atentamente,


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
Facultad de Tecnología de la Construcción
Dr. Ing. Oscar Gutiérrez Somarriba
Decano
MANAGUA, NICARAGUA

CC: Protocolo
Tutor
Archivo*Consecutivo
DIOGS*mary



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCION
DECANATURA

DEC.FTC.REF No. 011
Managua, enero 14 del 2016.

15

Bachilleres
ALLAN JAVIER HERNANDEZ VEGA
ERICK MAURICIO RIVAS ALBUQUERQUE
Presente

Estimados Bachilleres:

En atención a su carta de solicitud de PRORROGA, para finalizar su trabajo Monográfico titulado "EVALUACION HIDROTECNICA DEL PUENTE "BOAQUITO" EN LA COMARCA BOAQUITO, BOACO". Esta Decanatura aprueba la misma considerando los problemas planteados en su comunicación.

Deberán presentar concluida su Tesis debidamente revisada por el tutor guía el 14 de julio del 2016.

Esperando de ustedes puntualidad en la entrega de su trabajo final, me despido.

Atentamente,



DR. ING. OSCAR GUTIERREZ SOMARRIBA
Decano

CC: Tutor
Archivo-Consecutivo



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCION
DECANATURA

DEC.FTC.REF No. 0112
Managua, 08 Julio del 2016.

Bachilleres
ERICK MAURICIO RIVAS ALBUQUERQUE
Presente

Estimados Bachilleres:

En atención a su carta de solicitud de **PRORROGA**, para finalizar su trabajo De **Monografía** titulado **"EVALUACIÓN HIDROTÉCNIA DEL PUENTE BOAQUITO EN LA COMARCA BOAQUITO, BOACO"**. Esta Decanatura aprueba la misma considerando los problemas planteados en su comunicación.

Deberán presentar concluido su documento debidamente revisado por el tutor guía el **08 Agosto del 2016**.

Esperando de ustedes puntualidad en la entrega de su trabajo final, me despido.

Atentamente,


Dr. Ing. Oscar Gutiérrez Somarriba
Decano


CC: Tutor
Archivo-Consecutivo

NESTOR J. LANZA M., CONSULTOR



miércoles, 24 de agosto de 2016

DR. OSCAR GUTIERREZ SOMARIIBA
DECANO FTC
UNI

Estimado Dr. Gutiérrez Somarriba.

Tengo el agrado de dirigirme a Usted con relación a la conclusión de la tutoría de la monografía titulada "**Evaluación Hidrotecnia Del Puente Boaquito en la comarca Boaquito, Boaco**" elaborada por los **Br. Allan Javier Hernández Vega** y **Br. Erick Mauricio Rivas Albuquerque** como trabajo final para optar al título de Ingeniero Civil.

Considero que la monografía, contiene desarrollo de temáticas que analiza aspectos relacionado con el perfil de la hidráulica fluvial en el campo de la hidráulica de puente, así como la adquisición de conocimientos, desarrollo de habilidades y destreza para que se desempeñen como especialistas.

El estudio fue realizado de forma independiente, creativa por los Brs. **Hernández Vega** y **Rivas Albuquerque** y considero que llena los requisitos para ser presentado ante el jurado que Usted designe.

No omito en comunicarle, que este trabajo fue la recopilación de literaturas en el área especificada anteriormente y complementados con algunos resultados de campo y su aporte significativo al tema de la socavación de puente utilizando el programa ARCGIS, HEC HMS y HEC RAS.

Sin más asunto a que hacer referencia, me suscribo de Usted, en espera de haber cumplido la expectativa planteada.

Atentamente,

*Dr. Néstor J. Lanza M.
Ingeniero Civil Consultor
Colegiado N.º 240 13 Dic. 1985*

Dr. Néstor Javier Lanza Mejía

Agua y Saneamiento e Hidrotecnia vial

Consultor

CC.- Archivo

DEDICATORIA

A Dios por ser el principio y el fin de todo cuanto existe, nuestro pilar y dador de vida, nuestra fuente de esperanza en los momentos que todo parecía perdido. Por habernos provisto de empleo y los recursos materiales y humanos para la conclusión de este trabajo.

A nuestros padres por su apoyo permanente durante nuestros años de estudios y en la culminación de los mismos.

Allan Javier Hernández Vega
Erick Mauricio Rivas Albuquerque

A mi esposa Jeyling Solis Blandón, mi hijo Jared Mauricio Rivas y al bebé que viene en camino, por quienes he luchado por salir adelante y ser mejor esposo y padre cada día.

Erick Mauricio Rivas Albuquerque

AGRADECIMIENTO

Gracias Dios por habernos sostenidos durante nuestros estudios universitarios y del desarrollo de nuestro trabajo monográfico. Te damos también las gracias por haber puesto en nuestro camino amistades que nos hicieron crecer como personas y que nos ayudaron con sus valiosos consejos tanto en lo personal como en lo profesional. Bendice a todos los que nos ayudaron en completar este trabajo monográfico.

Agradecemos a nuestras familias por su constante apoyo durante el desarrollo de nuestros estudios universitarios y la conclusión del presente trabajo monográfico.

Agradecemos a nuestras autoridades universitarias por haber sido comprensivas a nuestra realidad y doble responsabilidad de estudiantes universitarios y trabajadores.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo monográfico consiste en realizar una evaluación hidrotécnica en la obra de drenaje Puente Boaquito ubicado en el tramo de carretera Papaturro – Santa Lucia sobre el Río Fonseca o Boaco.

El punto en estudio tiene una cuenca dividida en 63 sub cuencas donde el río principal tiene varios afluentes a lo largo de su recorrido en la cuenca analizada. La delimitación de la cuenca, ríos, sub cuencas y número de curva se determinaron haciendo uso de Arc Gis 9.3. Una vez construido el modelo se exportó a HEC-HMS 4.2. En HEC-HMS la precipitación se introduce utilizando un Hietograma Especificado encontrado con el Método del Bloque Alterno para un período de retorno de 100 años. El tránsito de los caudales es calculado utilizando el Método de Muskingum – Cunge. Se encuentra el caudal en el punto de cierre, el cual es de 1,506.8 m³/s

Se realiza análisis hidráulico del cauce principal y del puente con el programa HEC-RAS 5.0.3, los datos geométricos de ambos se obtienen mediante levantamiento topográfico en el sitio y se utiliza caudal calculado en el estudio hidrológico para determinar la capacidad hidráulica del puente existente. El análisis hidráulico muestra que el caudal que transcurre por el puente sobrepasa su capacidad hidráulica.

Utilizando HEC-RAS 5.0.3 se realiza análisis de socavación para el puente, haciendo uso de estudio de suelos para el diámetro medio. Los resultados del estudio muestran socavación total en el estribo izquierdo de 16.69m y una socavación total en el estribo derecho de 26.43m.

De la evaluación hidrotécnica se concluye que el puente se construyó sin estudio hidrológico, ni hidráulico motivo por el cual, su sección hidráulica no tiene capacidad para que transcurra el caudal para su período de retorno.

ÍNDICE

1.	GENERALIDADES.....	1
1.1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.2.	ANTECEDENTES.....	2
1.3.	JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4.	OBJETIVOS.....	4
1.4.1.	Objetivo General.....	4
1.4.2.	Objetivos Específicos.....	4
2.	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	5
2.1.	LOCALIZACIÓN.....	5
2.2.	CARACTERÍSTICAS SOCIO- ECONÓMICAS.....	6
2.3.	GEOGRAFÍA Y CLIMA.....	7
2.4.	CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA.....	7
2.5.	DESCRIPCIÓN DE LA OBRA DE DRENAJE EXISTENTE.....	9
3.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	11
3.1.	ANÁLISIS HIDROLÓGICO.....	11
3.1.1.	Geomorfología de la cuenca.....	11
3.1.1.1.	Parámetros Generales.....	11
3.1.1.2.	Parámetros de Forma.....	13
3.1.1.3.	Parámetro de Relieve.....	16
3.1.1.4.	Características de la red de drenaje.....	16
3.1.2.	Procesos hidrológicos y de transformación.....	18
3.1.2.1.	Precipitación.....	18
3.1.2.2.	Escorrentía.....	21
3.1.2.3.	Tránsito de Caudales.....	25
3.1.3.	ARC-GIS.....	27
3.1.3.1.	Conceptos Generales ArcMap.....	27
3.1.3.2.	Procedimientos para determinar y analizar una cuenca.....	28
3.1.4.	HEC-HMS.....	31
3.1.4.1.	Modelo de la Cuenca.....	32
3.1.4.2.	Modelo Meteorológico.....	33
3.1.4.3.	Especificaciones de control.....	34

3.1.4.4.	Entrada de datos.....	34
3.1.4.5.	Resultados.....	35
3.2.	ANÁLISIS HIDRÁULICO.....	36
3.2.1.	Introducción al Modelo HEC-RAS.....	36
3.2.2.	Componente de Datos Geométricos.....	37
3.2.2.1.	Sistema Esquemático del Río o Cauce....	37
3.2.2.2.	Secciones Transversales del Río o Cauce.....	38
3.2.2.3.	Áreas de Flujo Inefectivo.....	39
3.2.2.4.	Coeficientes de Contracción y Expansión.	40
3.2.3.	Ubicación de las Secciones Transversales.....	41
3.2.3.1.	Primera Sección transversal 1-1.....	42
3.2.3.2.	Longitud de Expansión L_e	42
3.2.3.3.	Segunda Sección Transversal 2-2.....	43
3.2.3.4.	Tercera Sección Transversal 3-3.....	43
3.2.3.5.	Cuarta Sección Transversal 4-4.....	44
3.2.3.6.	Longitud de Contracción L_c	44
3.2.4.	Longitudes Entre las Secciones Relativas del Puente...	45
3.2.4.1.	Longitud entre la sección 2-2 y la sección 1-1.....	45
3.2.4.2.	Longitud entre la sección 3-3 y la sección 2-2.....	45
3.2.4.3.	Longitud entre la sección 4-4 y la sección 3-3.....	46
3.2.5.	Áreas de Flujo Inefectivo en la Ubicación del Puente...	46
3.2.6.	Datos Geométricos del Puente.....	47
3.2.6.1.	Ubicación del Puente.....	47
3.2.6.2.	Condiciones de borde.....	47
3.2.6.3.	Información de descarga.....	48
3.2.6.4.	Coeficiente de rugosidad de Manning.....	48
3.3.	ANÁLISIS DE SOCAVACIÓN.....	53
3.3.1.	Modelo.....	53
3.3.2.	Socavación por Contracción.....	53

3.3.2.1.	Condición para determinar Socavación con Contracción con Lecho Vivo o con Agua Clara.....	53
3.3.2.2.	Contracción con Lecho Vivo.....	54
3.3.2.3.	Contracción con Agua Clara.....	56
3.3.3.	Socavación por Expansión.....	57
3.3.3.1.	Ecuación de Hire.....	57
3.3.3.2.	Ecuación de Froehlich.....	58
3.3.4.	Profundidad Total de Socavación.....	59
4.	METODOLOGÍA EMPLEADA.....	60
4.1.	INFORMACIÓN.....	60
4.2.	MODELACIÓN.....	60
4.2.1.	Análisis Hidrológico.....	60
4.2.1.2.	Procesos en ArcGis.....	60
4.2.1.3.	Procesos en HEC-HMS.....	61
4.2.2.	Modelo para Análisis Hidráulico y de Socavación.....	61
4.2.2.1.	Topografía y Estudio de Suelo.....	61
4.2.2.2.	Procesos en HEC-RAS para Análisis Hidráulico.....	61
4.2.2.3.	Procesos en HEC-RAS para Análisis de Socavación.....	62
4.3.	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	62
5.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	63
5.1.	MORFOLOGÍA DE LA CUENCA.....	63
5.1.1.	Delimitación de la Cuenca.....	63
5.1.2.	Parámetros Generales.....	63
5.1.2.1.	Cálculos.....	63
5.1.2.2.	Resumen de los Parámetros Generales...	64
5.1.3.	Parámetros de Forma.....	64
5.1.3.1.	Cálculos.....	64
5.1.3.2.	Resumen de los Parámetros de Forma....	65
5.1.4.	Parámetro de Relieve.....	65
5.1.4.1.	Cálculos y Resultado.....	65

5.1.5.	Características de la Red de Drenaje.....	65
5.1.5.1.	Cálculos.....	65
5.1.5.2.	Resumen de las Características de la Red de Drenaje.....	66
5.1.6.	Análisis e Interpretación de las Características Morfológicas de la Cuenca.....	66
5.2.	ESTUDIO HIDROLÓGICO.....	67
5.2.1.	Procesamiento de la información.....	67
5.2.1.1.	Selección de Estación Meteorológica.....	67
5.2.1.2.	Selección del Período de Retorno.....	67
5.2.1.3.	Obtención de Número de Curva.....	67
5.2.2.	Modelación HEC-HMS.....	70
5.2.2.1.	Modelo de la Cuenca.....	70
5.2.2.2.	Entrada de Datos.....	74
5.2.2.3.	Modelo de Control.....	78
5.2.2.4.	Modelo Meteorológico.....	78
5.2.3.	Resultados.....	79
5.2.4.	Análisis e Interpretación del Estudio Hidrológico.....	83
5.3.	ESTUDIO HIDRÁULICO.....	84
5.3.1.	Datos y Modelación.....	84
5.3.2.	Parámetros Hidráulicos.....	89
5.3.3.	Resultados.....	89
5.3.4.	Análisis e Interpretación del Estudio Hidráulico.....	97
5.4.	ESTUDIO DE SOCAVACIÓN.....	98
5.4.1.	Datos y Modelación.....	98
5.4.2.	Resultados.....	100
5.4.3.	Análisis e Interpretación del Estudio de Socavación....	101
	CONCLUSIONES.....	103
	RECOMENDACIONES.....	104
	BIBLIOGRAFÍA.....	105

1. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

Por su ubicación geográfica, Nicaragua ha sufrido los embates de fenómenos meteorológicos, que han afectado la región. En las últimas décadas estos eventos han causado un importante deterioro en la infraestructura vial del país causando pérdidas económicas.

Uno de los efectos de los eventos meteorológicos es el aumento abrupto del caudal de los ríos. Esto provoca inundaciones en las zonas bajas, arrastre de sedimentos y depósito de los mismos en las obras de cruce en un río. Todo este proceso perjudica el correcto funcionamiento de las obras de drenaje vial, al derribar estribos, obstaculizar alcantarillas, socavar pilas y como consecuencia final la inutilización de la obra.

El puente Boaquito está ubicado en el tramo de carretera Papaturro – Santa Lucía sobre el Río Fonseca o Boaco, en las coordenadas 12°26'38"N, 85°44'59"O. El puente es una estructura de 24 metros de claro y un ancho de 5 metros; con superestructura compuesta de vigas metálicas y una losa de concreto la cual proporciona una superficie de rodamiento de un carril y dos andenes; la estructura está fundada sobre estribos de mampostería de piedra bolón.

En este estudio se evaluará el sistema de drenaje transversal del puente existente para conocer si tiene la capacidad de evacuar la escorrentía que pasa por el cauce para garantizar su vida útil. El estudio se realizará desde el punto de vista Hidrológico e Hidráulico. La simulación Hidrológica determinará el caudal que debe evacuar cada elemento del desagüe superficial utilizando un hietograma de diseño. La simulación Hidráulica proporcionará una manera de análisis de la interrelación entre la topografía del cauce del río, los volúmenes de agua y sedimentos transportados y su impacto sobre la obra de cruce.

1.2. ANTECEDENTES

El territorio nicaragüense está dividido en 21 cuencas. Dentro de las cuencas y sobre las vías se sitúan distintas obras de drenaje. Su vulnerabilidad se evidenció con el paso del Huracán Mitch en octubre de 1998 el cual causó una destrucción parcial en 71 puentes. Asimismo, el invierno del año 2007 con fuertes lluvias y el paso del Huracán Félix causó daños, tomando como medida correctiva el Ministerio de Transporte e Infraestructura (MTI) la implementación del Plan de Emergencia de la Red Vial Invierno 2007.

Los daños ocasionados por las lluvias se acentuaron con mayor impacto como consecuencia de la deforestación excesiva en la zona debido al avance de la frontera agrícola. Los suelos agrícolas o pastizales no retienen grandes volúmenes de agua a como lo hacen los bosques. Grandes cantidades de tierras erosionadas se lavan en los ríos, haciendo los canales de estos más angostos y limitando la eficiencia del río sin que se desborde.

El puente “Boaquito” fue construido en 1977, contando con un largo de 20 m, un ancho de 5 m y una altura de 6 m. El puente “Boaquito” es parte de la red vial secundaria del país. Durante el invierno del 2007 el caudal del Río Fonseca aumentó a tal punto que pasó por encima del mismo. Esta crecida ocasionó la socavación parcial de las bases de piedra y el arrastre de grandes objetos que al final terminó destruyendo el puente. En el año 2009 el puente “Boaquito” fue reconstruido por el Ministerio de Transporte e Infraestructura (MTI).

1.3. JUSTIFICACIÓN

Una obra de cruce representa una inversión del erario público que garantiza el pase continuo de la producción del interior del país. Proteger estos bienes es de vital importancia para el buen desempeño de la economía, para lo cual se hace necesario realizar de manera periódica evaluaciones hidrotécnicas para determinar el estado de servicio de la obra.

El puente Boquito permite el transporte de la producción agrícola, de los pobladores y el comercio del municipio de Santa Lucía. Al ser destruido en el año 2007 se perjudicó a una población aproximada de 9,000 habitantes, la cual para poder mover su producción y realizar sus diligencias debían tomar rutas alternas en mal estado o cruzar el río. Durante dos años la población tuvo que pasar por esta dificultad, la más riesgosa de ellas cruzar el río en época de invierno. Ayudar a cruzar a las personas y la producción se volvió un empleo temporal para muchos, pero elevó los costos para las comunidades ocasionando pérdidas a los productores y encareciendo el costo de la vida.

En el año 2009 el puente Boquito fue reconstruido por el Ministerio de Transporte e Infraestructura (MTI). La reconstrucción de este puente tuvo una inversión total de 7,000,000 de córdobas. Para la reconstrucción se utilizaron estructuras rescatadas de otros puentes dañados durante el Huracán Félix y se reutilizaron los estribos. Esta inversión elevó el nivel de servicio de este camino secundario.

Este puente ya sufrió afectaciones importantes en su estructura debido al desbordamiento del Río Fonseca, causando la interrupción del paso continuo en el tramo de carretera Papaturro – Santa Lucía lo cual perjudicó a las poblaciones aledañas al mismo. Posterior a este evento se realizó una reconstrucción del puente. Debido a los antecedentes y a la necesidad de proteger la estructura recientemente reconstruida se hace necesario realizar este Estudio Hidrotécnico para determinar el comportamiento del puente ante un evento climático de gran importancia que pueda provocar afectaciones en el territorio.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Realizar evaluación Hidrotécnica del “Puente Boaquito”, haciendo uso de los softwares HEC-HMS 4.2 y HEC-RAS 5.0.3.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Determinar los parámetros morfológicos la cuenca hidrográfica según el punto de cierre.
2. Realizar levantamiento topográfico de las secciones del cauce aguas arriba y aguas abajo del “Puente Boaquito”.
3. Estimar el caudal en la obra de cruce utilizando el HEC-HMS 4.2.
4. Evaluar la capacidad hidráulica del “Puente Boaquito” utilizando HEC-RAS 5.0.3.
5. Realizar estudio de socavación del “Puente Boaquito” utilizando HEC-RAS 5.0.3.

2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1. LOCALIZACIÓN

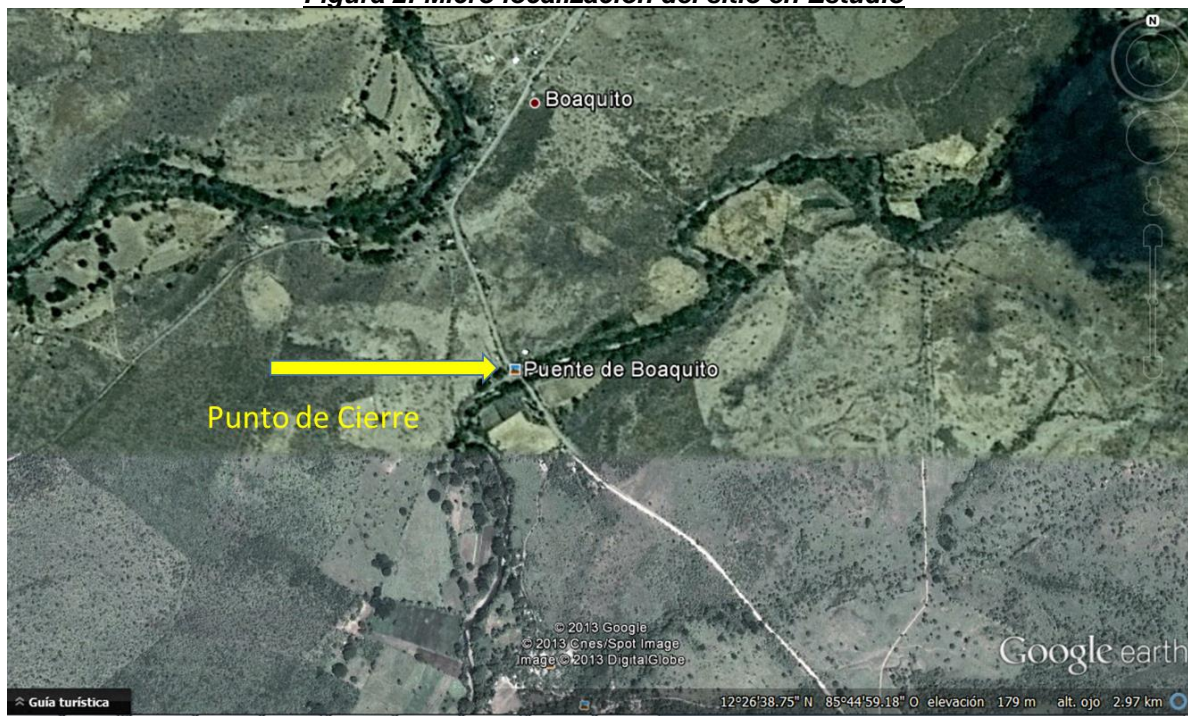
El puente Boaquito está ubicado en el departamento de Boaco, en el municipio de Santa Lucía, propiamente sobre el tramo de carretera Papaturro – Santa Lucía. La obra de cruce está sobre el Río Fonseca o Boaco, en las coordenadas 12°26'38"N, 85°44'59"O.

Figura 1: Macro localización del sitio en estudio



Mapa de Nicaragua: <http://www.mapasparacolorear.com/nicaragua/mapa-nicaragua.php>. Adaptado por Br. Hernández Vega y Br. Rivas Albquerque (2016)

Figura 2: Micro localización del sitio en Estudio



Tomado de Google Earth y adaptado por Br. Hernández Vega y Br. Rivas Albuquerque (2016)

2.2. CARACTERÍSTICAS SOCIO- ECONÓMICAS

La actividad económica principal es la agricultura, destacándose el cultivo de granos básicos y hortalizas, esta actividad es realizada básicamente por pequeños productores. El uso actual del suelo, está distribuido en la siguiente forma: el 45% de la tierra cultivable se dedica para cultivos perennes; el 30% en área de pastos para ganado, el 15% en la producción de cultivos anuales y el 10% restante en bosques. La actividad ganadera ocupa el segundo lugar en importancia en la actividad económica. En el sector de la producción pecuaria el municipio cuenta aproximadamente con seis mil cabezas de ganado vacuno, destinado en un 60% al doble propósito del hato, el 20% a la producción de carne, el otro 20% a la producción de leche con un rendimiento promedio de cuatro litros de leche por cabeza, la carga animal media para pasto es aproximadamente de una cabeza de ganado por cada manzana. La producción está destinada fundamentalmente al consumo interno.¹

¹ Biblioteca Virtual ENACAL. Caracterización Municipal de Santa Lucía.
http://biblioteca.enacal.com.ni/bibliotec/Libros/enacal/Caracterizaciones/Boaco/Santa_Lucia.pdf

2.3. GEOGRAFÍA Y CLIMA

La cuenca en estudio parte de las estribaciones de la Cordillera de Amerrisque, en descenso hacia las costas del lago Cocibolca, se considera en su casi total extensión territorial como terreno quebrado, pero con extensiones de tierras muy fértil. La misma presenta tres tipos de clima: Tropical (partes bajas), Semihúmedo y Húmedo en las estribaciones de sus serranías. La temperatura anual promedio oscila entre los 25 y 26° C, y la precipitación pluvial anual es de 1,000 a 1,600 milímetros.²

2.4. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA

La cuenca en estudio se ubica en la sub cuenca del Río Malacatoya al ser el Río Fonseca o Boaco el principal afluente del río Malacatoya. La microcuenca del Río Fonseca se encuentra deforestada ya que sus suelos son utilizados para fines agrícolas y de pastizales. El uso agrícola se centra en la siembra de granos básicos y hortalizas mientras que en el caso de los pastizales encontramos pastos naturales así como raza criolla utilizada para la ganadería. El Río Fonseca o Boaco está contaminado por el vertido de aguas negras y de aguas residuales de las queseras.³

En la obra de cruce se observa que aguas arriba, el cauce del río tiene agua en reposo que se reduce hasta quedar únicamente el lecho rocoso aguas abajo. Tanto aguas arriba como aguas abajo se observa la presencia de vegetación y árboles en las márgenes del río.

² Biblioteca Virtual ENACAL. Caracterización Municipal de Santa Lucía.
http://biblioteca.enacal.com.ni/bibliotec/Libros/enacal/Caracterizaciones/Boaco/Santa_Lucia.pdf

³ CATIE. Informe Línea Base Sub Cuenca del Río Malacatoya. Managua, Nicaragua. 2008

Figura 3: Río Boaco aguas arriba del Puente Boaquito



Fotografía tomada por Br. Rivas Albuquerque

Figura 4: Río Boaco aguas abajo del Puente Boaquito



Fotografía tomada por Br. Rivas Albuquerque

2.5. DESCRIPCIÓN DE LA OBRA DE DRENAJE EXISTENTE

En el punto de cierre del presente estudio hay un puente de 24 metros de claro y 5 metros de ancho y una altura aproximada de 6.80 metros de claro libre, proporcionando una superficie de rodamiento de un carril y dos andenes. El puente está basado en dos estribos de mampostería con obras de protección del mismo material para evitar socavación local en estribos, superestructura de vigas I con baranda, y aproche de entrada y salida.

Figura 5: Aproche de Entrada



Fotografía tomada por Br. Rivas Albuquerque

Figura 6: Vista Parcial de Superficie de Rodamiento y Aprovecho de Salida



Fotografía tomada por Br. Rivas Albuquerque

Figura 7: Puente Boaquito visto desde aguas abajo



Fotografía tomada por Br. Hernández Vega

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. ANÁLISIS HIDROLÓGICO

En una obra hidráulica a evaluar se inicia con el estudio hidrológico, que se compone de un análisis morfológico de la cuenca, así como de un proceso hidrológico y los parámetros de transformación de la precipitación a escorrentía con el fin de obtener el caudal de diseño. Se pueden utilizar métodos manuales o softwares como HEC-HMS.

3.1.1. Geomorfología de la cuenca^{4, 5 y 6}

3.1.1.1. *Parámetros Generales*

Los parámetros generales recogen los aspectos más básicos de una cuenca hidrográfica, constituyen la información mínima que se debe conocer para tener una idea general de la naturaleza y comportamiento de una cuenca.

Los parámetros generales son:

a) Área de la cuenca

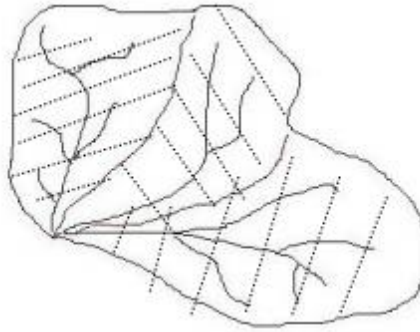
El área de la cuenca está definida por el espacio que delimita la curva del perímetro. La curva del perímetro se puede trazar mediante fotointerpretación de fotografías aéreas o mapas topográficos, o el empleo de softwares especializados. El área es el factor más importante en la relación escorrentía – características morfológicas. El área se puede calcular por métodos manuales utilizando papel milimetrado o un planímetro; así como por medio de herramientas informáticas tales como softwares SIG (ArcView, ArcGis, etc.) o de dibujo asistido (ACAD, etc).

⁴ Universidad Politécnica de Valencia. Morfología de la Cuencas hidrográficas.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10782/Morfolog%C3%ADa%20de%20una%20cuenca.pdf>

⁵ Hidrología. Tomo I: Componente Biofísico. Corporación Suna Hisca (Colombia).

⁶ COMITRAN. Manual de Consideraciones Técnicas Hidrológicas e Hidráulicas para la Infraestructura Vial en Centroamérica. SIECA. 2016

Figura 8: Área de una Cuenca



Tomado de Universidad Politécnica de Valencia. Morfología de la Cuencas hidrográficas.

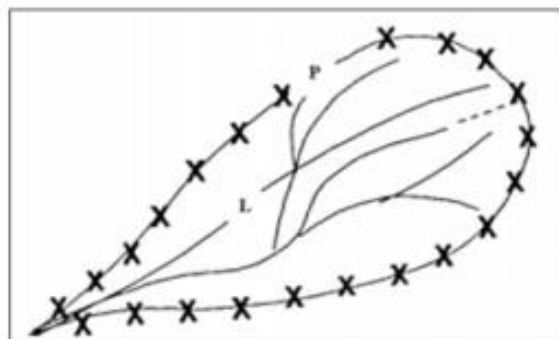
b) Longitud de Cauce

La longitud de cauce es la longitud del cauce principal de la cuenca. Es la distancia equivalente que recorre el río entre el punto de desagüe, aguas abajo y el punto situado a mayor distancia topográfica, aguas arriba. Influye grandemente en la generación de escorrentía y por ello es fundamental en el cálculo de la mayoría de los índices morfométricos.

c) Perímetro

El perímetro es la longitud de la divisoria de aguas que forma la cuenca. Define la forma de la cuenca ya que para una misma superficie, los perímetros de mayor valor corresponden a cuencas alargadas mientras que los de menor valor lo hacen con cuencas redondeadas.

Figura 9: Perímetro de una cuenca



Tomado de Universidad Politécnica de Valencia. Morfología de la Cuencas hidrográficas.

d) Ancho

El ancho es la relación que hay entre el área y la longitud de cauce. Se calcula empleando la siguiente fórmula:

$$W = \frac{A}{L}$$

Donde:

W: Ancho de la cuenca en km.

A: Superficie de la cuenca en km².

L: Longitud de cauce en km.

e) Desnivel Altitudinal

Es el valor de la diferencia entre la cota más alta del cauce llamada altura máxima y la cota más baja del cauce llamada altura mínima. Se calcula empleando la siguiente fórmula:

$$DA = H_{\max} - H_{\min}$$

Donde:

DA: Diferencia Altitudinal

H_{max}: Altura Máxima

H_{min}: Altura Mínima

3.1.1.2. *Parámetros de Forma*

Los parámetros de forma determinan el comportamiento hidrológico, ya que cuencas con la misma área, pero con diferente forma presentan diferentes respuestas hidrológicas. Por lo tanto, algunos parámetros tratan de cuantificar las características por medio de índices o coeficientes.

Los parámetros de forma son:

a) Coeficiente de Compacidad o Coeficiente de Gravelius

El coeficiente de compacidad relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de una cuenca circular teórica de igual área. Este coeficiente estima la relación entre el ancho promedio del área de captación y la longitud de la cuenca. Toma siempre un valor mayor a la unidad, creciendo con la irregularidad de la cuenca.

Para una cuenca con un coeficiente de compacidad en aumento, el tiempo de concentración será mayor. De ahí, es de esperarse que la magnitud de la esorrentía generada por una precipitación en ella sea menor que en aquélla que posee un menor coeficiente de compacidad. La forma de la cuenca es un indicador de la manera como se distribuyen espacialmente las tormentas y del patrón de esorrentía de la cuenca. Una forma alargada implica que el agua discurre por varios cauces hasta llegar a un cauce principal, lo cual resulta en una respuesta más lenta.

De acuerdo al valor del índice de compacidad, pueden realizarse clasificaciones sobre la elongación de las cuencas. Un ejemplo de esto es definir las como circulares, si presentan un valor, entre 1.0 y 1.25; ovaladas, entre 1.25 y 1.50; oblongas, entre 1.50 y 1.75; rectangular oblonga, entre 1.75 y 2.0; rectangular alargada, más de 2. Cabe resaltar que esta clasificación no es única, otras referencias bibliográficas pueden utilizar diferentes valores para catalogar las cuencas.

Se calcula empleando la siguiente formula:

$$K_g = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

K_g : Coeficiente de Gravelius

P : Perímetro de la cuenca en km

A : Área de la cuenca en km^2

b) Factor de Forma

Es una característica que incide mayormente en la tasa de velocidad a la que el flujo llega al cauce principal y luego al sitio de interés.

Cuencas con formas más alargadas y estrechas, comparadas en igualdad de condiciones con otras más anchas, poseen picos de descarga más bajos. De la misma forma, cuencas cuyo centroide se encuentra más alejado de su punto de descarga, presentan picos más bajos, es decir, a medida que esta distancia se acorta, los picos de descarga se vuelven mayores. Por lo anterior, la importancia de definir este factor muestra que el pico más elevado traslada un volumen determinado en menor tiempo, lo cual obliga a tener en cuenta este fenómeno

en el diseño de la estructura de drenaje. Por consiguiente, esta situación debe advertir al diseñador sobre futuras condiciones de las obras a construir. Uno de los efectos que se pueden dar por este fenómeno es la sobre elevación del flujo a causa del remanso, dependiendo además de las condiciones de entrada de la obra.

En cuanto a la dirección de la precipitación, cuando ésta avanza de forma transversal al eje de las cuencas alargadas, las tasas de escorrentía son menores que cuando la precipitación avanza de forma longitudinal al eje. El factor de forma (K_f) es la relación entre el ancho promedio de la cuenca (B) y la longitud del curso principal del río (L). Mientras que el ancho promedio, es la relación del área de la cuenca (A) y la longitud de su cauce principal. Por lo que:

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

Donde:
 K_f : Factor de Forma
 A : Área de la Cuenca en km^2
 L : Longitud en km

c) Rectángulo Equivalente

Es la transformación geométrica de la cuenca real a una superficie rectangular de lados L y l del mismo perímetro de tal forma que las curvas de nivel se convierten en rectas paralelas a los lados menores del rectángulo (l). Esta cuenca teórica tendrá el mismo Coeficiente de Gravelius y la misma distribución actitudinal de la cuenca original. Se calcula empleando la siguiente fórmula:

$$L = \frac{K_g \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_g} \right)^2} \right]$$

$$l = \frac{K_g \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_g} \right)^2} \right]$$

Donde
 L : altura del rectángulo en km
 l : base del rectángulo en km
 K_g : Coeficiente de Gravelius
 A : Área de la cuenca en km^2

3.1.1.3. Parámetro de Relieve

El relieve de una cuenca tiene más influencia sobre la respuesta hidrológica que su forma. De forma general se puede decir que a mayor relieve o pendiente se genera escorrentía en lapsos de tiempos menores:

El parámetro de relieve es:

- a) Pendiente media del cauce o pendiente de fonda de cauce:

Es la relación existente entre el desnivel altitudinal del cauce y su longitud. Puede ser expresada como decimal o porcentaje. Se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$S_c = \frac{DA}{L}$$

Donde:
Sc: Pendiente de fondo de cauce
DA: Desnivel Altitudinal
L: Longitud de cauce

3.1.1.4. Características de la red de drenaje

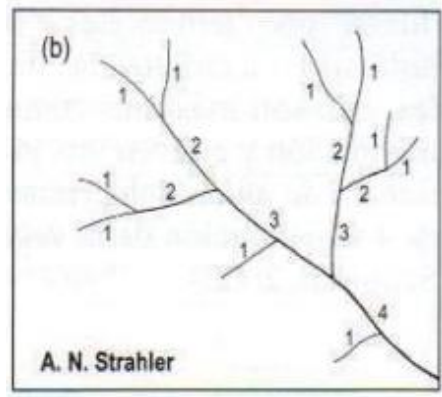
Las características de la red de drenaje son:

- a) Jerarquización de la red fluvial

La jerarquización permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. El orden se relaciona con el caudal relativo del segmento de un canal. Hay varios sistemas de jerarquización, siendo los más utilizados el método de Horton y el método de Strahler. Por el método de Horton los canales van numerados en función del número de afluentes que tengan, de forma que aquel que fluye desde el origen y no tiene ningún afluente es de orden 1, mientras que uno de orden 2 recibe dos afluentes. Si un canal recibe un afluente de orden 1 y otro de orden 2, su orden será 3. El orden de los canales va aumentando de uno en uno, de forma que, aunque un canal recibiera uno de orden 2 y otro de orden 3, su orden sería 4. Cada canal tiene un único orden, que se corresponderá con el mayor que puede tener al final de su recorrido. El método de Strahler es muy parecido a Horton, con la diferencia de que un mismo canal puede tener segmentos de distinto orden a lo largo de su curso, en función de los afluentes que le llegan

en cada tramo. El orden no se incrementa cuando a un segmento de un determinado orden confluye uno de orden menor.

Figura 10: Ejemplo de Jerarquización por el método de Strahler



Tomado de Universidad Politécnica de Valencia. Morfología de la Cuencas hidrográficas.

b) Densidad de drenaje

Es un importante indicador de la forma del terreno y del grado de erosión que puede tener la cuenca en función de los factores geológicos, de vegetación y de tipo de suelo.

En algunos casos, la densidad de drenaje no proporciona la verdadera medida de la eficiencia de drenaje. Sin embargo, de forma general, refleja el potencial de la magnitud de inundación. A manera genérica, cuanto mayor sea el valor de la densidad de drenaje, mayor será el pico y el volumen total de la esorrentía. Generalmente, los valores van desde 0.5 km/km² para cuencas con pobre drenaje, hasta 3.5 km/km² para cuencas bien drenadas.

$$D_d = \frac{\sum Lc_i}{A}$$

Donde:

Dd: Densidad de Drenaje

$\sum Lc_i$: Suma total de las longitudes de todos los cauces en la cuenca, en km

A: Área de la cuenca en km²

3.1.2. Procesos hidrológicos y de transformación

3.1.2.1. Precipitación

Los aspectos a considerar de la precipitación son:

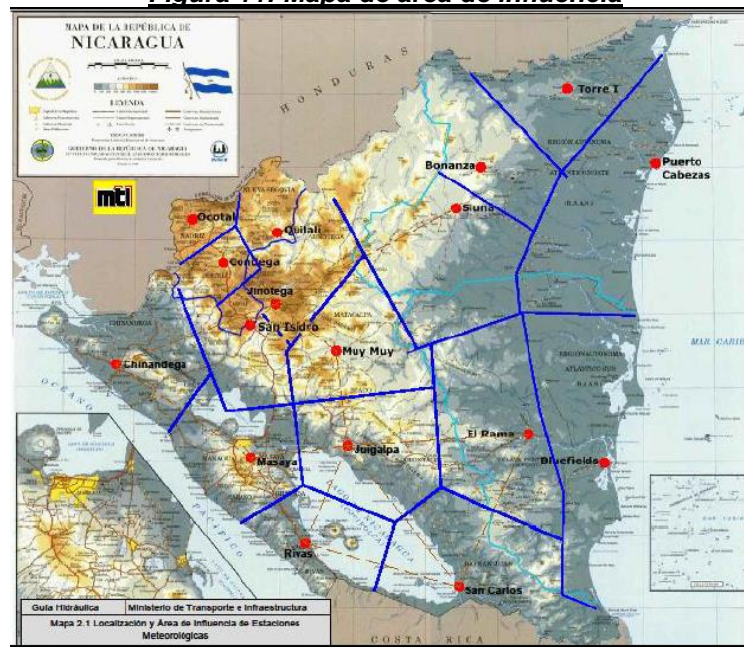
a) Definición

La precipitación es el punto de partida de la mayoría de los estudios concernientes al uso y control del agua ya que es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre.⁷

b) Estación meteorológica y su selección:

Los datos de precipitación se obtienen de las estaciones meteorológicas. En Nicaragua el funcionamiento y la administración de los datos de las mismas está a cargo del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). De las estaciones meteorológicas existentes que miden intensidad, el Ministerio de Transporte e Infraestructura seleccionó aquellas que son representativas y dividió el territorio nacional mediante los polígonos de Thiessen para definir el área de influencia de las mismas a como lo muestra el siguiente mapa.⁸

Figura 11: Mapa de área de influencia



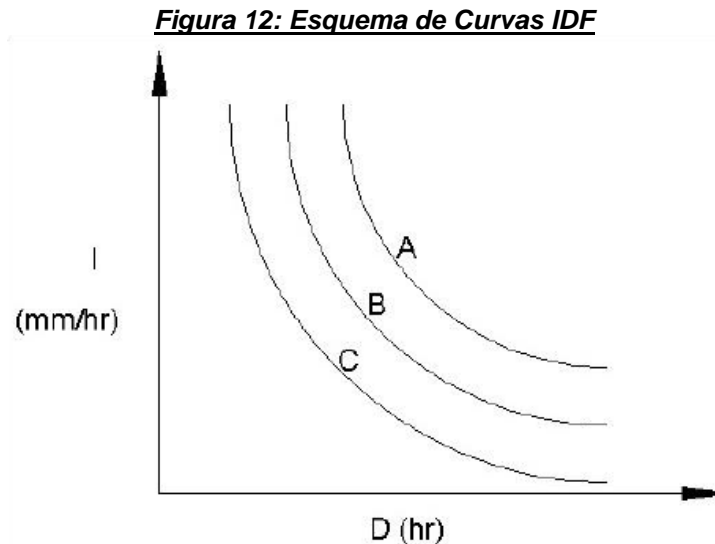
Tomado de: MTI. Guía Hidráulica para el diseño de estructuras de drenaje de caminos rurales.

⁷ Aparicio Mijares, Franciso. Fundamentos de la Hidrología de superficie. Grupo Noriega Editores, 1992

⁸ MTI. Guía Hidráulica para el diseño de estructuras de drenaje en caminos rurales. Septiembre 2011

c) Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia⁹

La intensidad es la profundidad de la lluvia por unidad de tiempo. Las curvas IDF relacionan las intensidades de precipitación para distintos períodos de retorno.



Tomado de: MTI. Manual para la Revisión de Estudios Hidrotécnicos de drenaje mayor.

d) Período de retorno y su selección:¹⁰

El período de retorno es el tiempo promedio para que un evento o suceso sea igualado o excedido. También es conocido como el intervalo de recurrencia. Para la selección del mismo se utiliza la siguiente tabla en base a la Clasificación Funcional establecida por el MTI.

⁹ MTI. Manual para la revisión de Estudios Hidrotécnicos de drenaje mayor. Octubre 2008

¹⁰ MTI. Manual para la revisión de Estudios Hidrotécnicos de drenaje mayor. Octubre 2008

Tabla 1: Períodos de Retorno en Base a Clasificación Funcional de la Carretera

Tipo	Revisión de Flujo			
Clasificación Funcional de Carreteras	10	25	50	100
Troncal Principal				
Caja – Puente			X	X
Puentes Grandes			X	X
Puentes Pequeños			X	X
Troncal Secundaria				
Caja – Puente			X	X
Puentes Grandes			X	X
Puentes Pequeños			X	X
Colectora Principal				
Caja – Puente			X	X
Puentes Grandes			X	X
Puentes Pequeños	-	-	-	-
Colectora Secundaria				
Caja – Puente		X	X	X
Puentes Pequeños		X	X	X
Caminos Vecinales				
Caja – Puente		X	X	X
Puentes Grandes		X	X	X
Puentes Pequeños		X	X	X

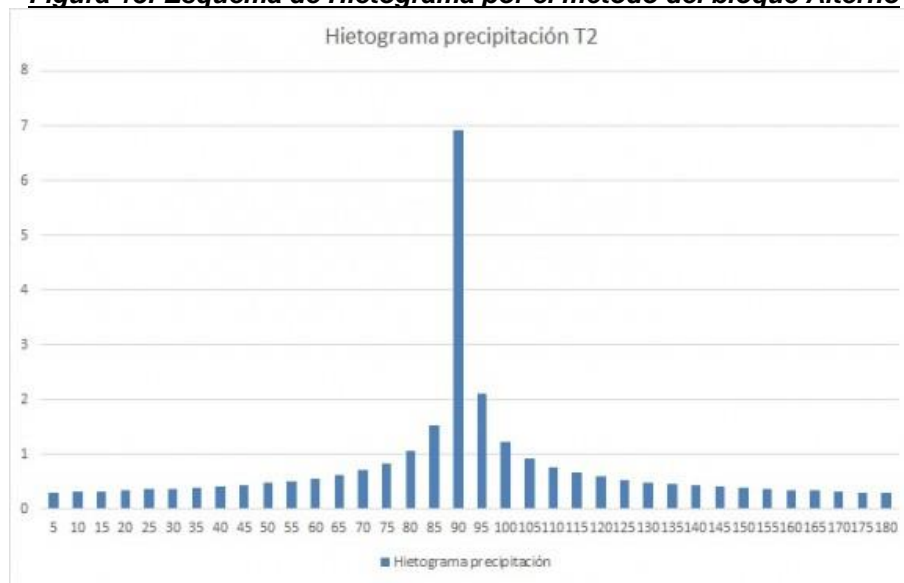
Tomado de: MTI. Manual para la revisión de Estudios Hidrotécnicos de drenaje mayor. Octubre 2008

e) Método del Bloque Alterno¹¹

Metodología que permite desarrollar un hietograma utilizando como base las curvas IDF. El método produce un hietograma que da la profundidad de la precipitación que ocurre en una serie de intervalos de un tiempo especificado. Se toma la diferencia entre los valores de profundidad de precipitación y se añade. El hietograma es ordenado de tal forma que la intensidad máxima quede en el centro de la duración requerida.

¹¹ Chow, Ven Te; Maidment, David R; Mays, Larry W. Hidrología Aplicada. McGraw Hill. 1994

Figura 13: Esquema de Hietograma por el método del bloque Alterno



Tomado de Olivares, Jordi. Como obtener hietogramas a partir de Curvas IDF.
<http://www.hidrojing.com/como-obtener-hietogramas-a-partir-de-curvas-idf-para-hec-hms-y-swmm/>

3.1.2.2. **Escorrentía**

Los aspectos a considerar en la escorrentía son:

a) Definición¹²

Escorrentía o escurrimiento es el agua que circula sobre o bajo la superficie de la tierra producto de la precipitación y que llega a una corriente para ser drenada al final de la cuenca.

b) Tiempo de Concentración¹³

El tiempo de concentración (t_c) se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca aporten agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida de ésta. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante; el punto hidrológicamente más alejado es

¹² Chow, Ven Te; Maidment, David R; Mays, Larry W. Hidrología Aplicada. McGraw Hill. 1994

¹³ COMITRAN. Manual de Consideraciones Técnicas Hidrológicas e Hidráulicas para la Infraestructura Vial en Centroamérica. SIECA. 2016

aquél desde el que el agua de escorrentía emplea más tiempo en llegar a la salida.

Se debe seleccionar para un determinado periodo de retorno la intensidad que corresponde a una duración de la lluvia igual al tiempo de concentración de la cuenca.

Existen una serie de fórmulas que permiten el cálculo de este tiempo, en Nicaragua se utiliza la fórmula del Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano (PHCA) desarrollada por el Ingeniero Basso y colaboradores.

La fórmula es:

$$T_c = 0.01026 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

Donde

T_c: Tiempo de Concentración en minutos

L: Longitud del cauce principal en metros

S: Pendiente media del cauce principal en m/m

c) Pérdidas¹⁴

Pérdida es la diferencia entre la precipitación total y la precipitación neta. Existen una serie de métodos para calcular la pérdida en una cuenca hidrográfica. Cada método tiene sus restricciones en el tamaño de las sub cuencas, así como en sus aplicaciones, a como se detalla en la siguiente tabla:

¹⁴ Manual para la revisión de Estudios Hidrotécnicos de drenaje mayor. MTI. Octubre 2008

Tabla 2: Restricciones en el uso de Métodos Hidrológicos

Método	Limitación de Tamaño	Comentarios
Racional	0 – 3.0 km ²	El Método puede ser usado para la estimación de flujos picos y el diseño de sitios pequeños o subdivisión de sistemas de alcantarillado pluvial. No usarse para diseñar almacenamientos.
SCS	0 – 8.1 km ²	El Método puede ser usado para la estimación de flujos picos e hidrogramas para todas las aplicaciones de diseño.
USGS	0.10 – 64.75 km ²	El Método puede ser usado para estimación de flujos picos para todas las aplicaciones de diseño.
USGS	0.51 – 64.75 km ²	El Método puede ser usado para estimación de hidrogramas para todas las aplicaciones de diseño.

Tomado de: MTI. Manual para la revisión de Estudios Hidrotécnicos de drenaje mayor. Pg 17

El método del número de curva de escorrentía fue desarrollado por el Servicio de Conservación Suelos, hoy Servicio de Conservación de Recursos Naturales.

El número de curva varía de un rango de 1 a 100, en función del tipo de suelo, uso de la tierra y tratamiento, condición superficial del suelo y condiciones de humedad antecedentes.

La abstracción inicial consiste principalmente de interceptación, infiltración y almacenaje de superficie, todo lo cual ocurre antes de que comience la escorrentía. Basado en cuencas pequeñas experimentales la fórmula de abstracción inicial es:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

Donde:

Q: Escorrentía

P: Precipitación

S: Retención máximo potencial

El cálculo de la retención máxima potencial después que comienza la precipitación se calcula mediante:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

Donde:

S: Retención máximo potencial

CN: Número de Curva

Por tanto, es necesario establecer el número de curva para el cálculo de la escorrentía basado en la siguiente tabla:

Tabla 3: Número de Curva según el uso del suelo

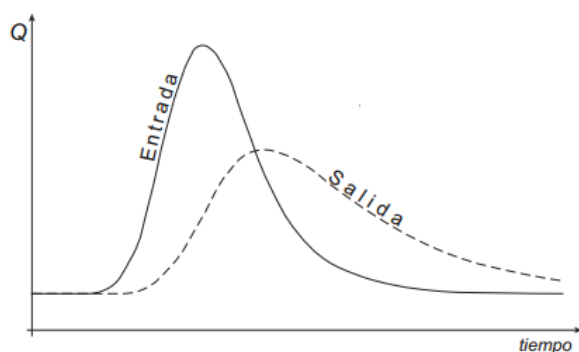
Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra Cultivada				
sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales				
Condiciones pobres	68	79	86	89
Condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos condiciones óptima	30	58	71	78
Bosques				
Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	45	66	77	83
Cubiertas buenas	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
Óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75%<	39	61	74	80
Condiciones aceptables	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeable)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial				
1/8 acre o menos 65% impermeable	77	85	90	92
1/4 acre 38% impermeable	61	75	83	87
1/3 acre 30% impermeable	57	72	81	86
1/2 acre 25% impermeable	54	70	80	85
1 acre 20% impermeable	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.	98	98	98	98
Calles y carreteras				
Pavimentos con cunetas y alcantarillados	98	98	98	98
Grava	76	85	89	91
tierra	72	82	87	89

Tomado de: MTI. Manual para la revisión de Estudios Hidrotécnicos de drenaje mayor.

3.1.2.3. Tránsito de Caudales¹⁵

En el tránsito de caudales en un depósito o canal produce un aumento brusco del caudal de entrada que será reflejado en la salida atenuada (caudal máximo menor) y retardado (caudal máximo retrasado en el tiempo) a como muestra la gráfica:

Figura 14: Gráfica de efecto de retardo y atenuación en un hidrograma de entrada y salida



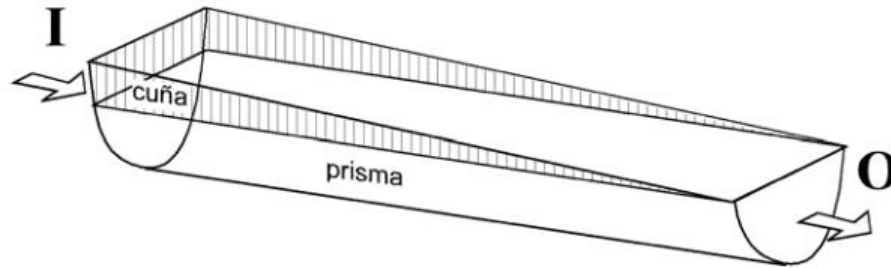
Tomado de: Sánchez San Ramón, F javier. Tránsito de Hidrogramas. Universidad de Salamanca

Para el cálculo de dicho efecto en un tramo de cauce existen diversos métodos entre los cuales está el Método Muskingum – Cunge. El Método Muskingum – Cunge combina el Método Muskingum con modelos hidráulicos.

El Método Muskingum toma su nombre del distrito donde fue desarrollado en los años 30 por el Servicio de Conservación de Suelos. El método parte del concepto de retardo y atenuación aplicado a un tramo de canal. En el tramo se produce un almacenamiento (S) que se descompone en dos partes: almacenamiento en prisma, que sería proporcional al caudal de salida (O) y almacenamiento en cuña, que sería función de la diferencia entre el caudal de entrada y de salida ($I - O$) a como se aprecia en la figura 18.

¹⁵ Sanchez San Ramón, F Javier. Tránsito de Hidrogramas. Universidad de Salamanca. Julio 2013
http://hidrologia.usal.es/temas/Transito_Hidrogramas.pdf

Figura 15: Almacenamiento en Cauce según el Método Muskingum



Tomado de: Sánchez San Ramón, F javier. Tránsito de Hidrogramas. Universidad de Salamanca

A partir de este modelo se desarrolla el modelo matemático que se detalla a continuación:

$$S_{\text{prisma}} = K(O)$$

$$S_{\text{cuña}} = b(I - O)$$

Donde:

S: almacenamiento en el tramo

I: caudal de entrada en el tramo

O: caudal de salida en ese tramo

K: constante almacenamiento en prisma

B: constante de almacenamiento en cuña

Sumando las dos expresiones se obtiene:

$$S = S_{\text{prisma}} + S_{\text{cuña}} = KO + b(I - O) = bI + (K - b)O = K \left[\frac{b}{K} I + \frac{K - b}{K} O \right]$$

$$S = K \left[\frac{b}{K} I + \left(1 - \frac{b}{K} \right) O \right]$$

Si denominamos X a la relación b/K entre las dos constantes consideradas se obtiene:

$$S = K[XI + (1 - X)O]$$

Al aplicar dicha expresión para varios tiempos y en la ecuación

$$\frac{I_{i-1}}{2} - \frac{O_{i-1}}{2} = \frac{S_i - S_{i-1}}{\Delta t}$$

Se obtiene que para el caudal de salida en tiempo t.

$$O_i = C_0 I_i + C_1 I_{i-1} + C_2 O_{i-1}$$

Al combinar los métodos hidráulicos en la formulación del Método Muskingum – Cunge, se utilizan las constantes K y X del método Muskingum, mediante parámetros hidráulicos del cauce.

$$K = \frac{\Delta x}{c}$$

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{BS_0 c \Delta x} \right)$$

Δx : longitud del tramo del cauce considerado
 c : “celeridad” = velocidad media, m
 m : aproximadamente 5/3 para cauces naturales amplio.
 S_0 : pendiente media del cauce.
 Q : Caudal
 B : anchura del cauce

3.1.3. ARC-GIS¹⁶

El Instituto de Investigaciones de Sistemas Ambientales (ESRI por sus siglas en inglés) desarrolló el programa ArcMap, en el cual se puede visualizar información geográfica y modelos a diferentes escalas, así como entender las relaciones existentes en información espacial geográfica y crear mapas, gráficos y tablas. ArcGis a su vez cuenta con la extensión HEC-GeoHMS desarrollada como un grupo de herramientas hidrológicas geoespaciales para crear entradas hidrológicas que puedan utilizarse directamente con HEC-HMS.

3.1.3.1. Conceptos Generales ArcMap

El uso de ArcMap requiere de aplicar los siguientes conceptos de forma correcta.

- Tema: es una capa que representa un elemento geográfico del mundo real tales como ríos, departamentos, pozo entre otros. Su representación se hace mediante los elementos de tema polígonos, líneas, y puntos.
- Vista: Interfase gráfica del ArcMap en la cual se manipula un mapa
- Layout: Interface gráfica de ArcMap en la cual se crea el diseño de impresión de un mapa.
- Vector: Provee ubicación exacta de objetos geográficos representados por polígonos, líneas y puntos utilizando un sistema de coordenadas.

¹⁶ Casco Arévalo R. ArcGis 9.3, Hec-GeoHMS, HEC-HMS 3.5. Publicación electrónica.

- e) Raster: Modelo de cuadrícula o celdas rectangulares donde cada celda es definida por su número de línea y columna cuyo valor asignado representa un atributo del objeto geográfico que representa.
- f) Coberturas: Modelos de datos georelacionales de ESRI.
- g) Shape: formato de datos geográficos de ArcView que pueden representar objetos geográficos de polígonos, líneas y puntos.
- h) Geodatabase: Unidad primaria en las clases de datos geográficos siendo una colección de clases de datos, clases geográficas, objeto clases y clases de relaciones:
 - ✓ Clases de datos: representa los modelos de datos geográficos conocidos en Geodatabase como clase geográfica, clase raster y clase TIN.
 - ✓ Objetos clase: Tabla dentro de un Geodatabase que mantienen información descriptiva de los objetos geográficos que representan o relacionan, pero no tienen ninguna representación geométrica.
 - ✓ Clase de relación: Tabla que guarda las relaciones entre objetos geográficos de una o varias clases geométricas u objeto clases.

3.1.3.2. Procedimientos para determinar y analizar una cuenca

Una vez creado el proyecto en ArcGis, se importa el Modelo Digital de Elevaciones, DEM por sus siglas en inglés, del área en estudio y se utiliza ArcHydro Tools para procesar el terreno. En la Tabla 4 se detallan las herramientas a utilizar y la función que realizan cada una de ellas para llevar a cabo el proceso del terreno.

Tabla 4: Herramientas y sus funciones para Procesar el Terreno

Herramienta	Función
Fill Sinks	Rellena las imperfecciones existentes en la superficie del DEM con el objeto de determinar correctamente la dirección de flujo.
Flow Directions	Define la dirección del flujo de una celda a otra indicando el descenso con mayor pendiente de una celda a otra.
Flow Accumulation	Calcula la acumulación de flujo en cada celda determinando el número de celdas aguas arriba que vierten sobre cada una de las celdas inmediatamente aguas abajo-
Stream Definition	Utiliza Flow Accumulation y especificaciones del usuario para definir los cauces
Stream Segmentation	Utiliza la información de flow directions y stream definitions para individualizar los cauces.
Catchment Grid Delineation	Crea cuadrícula donde cada celda tiene un valor que indica a que área de captación pertenece dicha celda.
Catchment Polygon Processing	Transforma la cuadrícula de Catchment Grid Delineation a un polígono.
Drainage Line Processing	Utiliza Stream Segmentation y Flow Direction para crear línea de drenaje que identifica a que área de captación pertenece.
Adjoint Catchment Processing	Establece que áreas de captación no reciben drenaje aguas arriba y crea un polígono que establece todos las áreas aguas arriba que van drenando.

Tomado de ESRI. Arc Hydro Tools-Tutorial. 2011. Traducción libre por Br. Rivas Albuquerque.
Adaptado por Br. Hernández Vega

Una vez procesado el terreno se procede a establecer el primer enlace con HMS. Para ello se crea un nuevo Proyecto en el componente HEC-GeoHMS, se le nombra y se procede a insertar el Punto del Proyecto. Para concluir se realiza la función “Project Generation” y se seleccionan las capas correspondientes para que el programa genere la cuenca.

Se debe verificar que las subcuencas generadas tengan las áreas indicadas para el método hidrológico que se proyecta a utilizar. Se unen y dividen las sub cuencas según las características que las mismas tengan y los criterios del método hidrológico.

HEC-GeoHMS tiene las herramientas que permiten extraer las características físicas de los ríos y las sub cuencas a una tabla de atributos. La Tabla 5 detalla las herramientas y las funciones que realizan:

Tabla 5: Herramientas HEC-GeoHMS para Características Físicas.

Herramienta	Función
River Length	Calcula la longitud de los cauces y lo guarda en campo llamado RivLen
River Slope	Calcula la pendiente de los cauces, identificando la elevación aguas arriba y la elevación aguas abajo. Guarda la información en los campos ElevUp, ElevDS y Slp.
Basin Slope	Calcula la pendiente media de cada sub cuenca. Guarda la información en campo BasinSlope
Longest Flow Path	Crea una poli línea que almacena la longitud, cotas aguas arriba y aguas abajo, así como la pendiente del flujo más largo
Basin Centroid	Crea un punto donde se guarda el centroide de cada sub cuenca. Para determinar la ubicación del centroide se puede utilizar el método del centro de gravedad o el método del flujo más largo.
Centroid Elevation	Calcula la elevación de cada centroide.
Centroidal Longest Flow Path	Crea una poli línea que muestra el flujo desde el centroide junto con el flujo más largo.

Tomado de Merwade, V. Terrain Processing and HMS-Model Development using GeoHMS. Pardue University. 2012. Traducción libre por Br. Rivas Albuquerque. Adaptado por Br. Hernández Vega

En HEC-GeoHMS se selecciona los parámetros hidrológicos de la cuenca los cuales son, Método de pérdida, Método de transformación, Método flujo base y Método de Tránsito de Avenida. Se completa este procedimiento al realizar las funciones “River autaname” y “Basin autaname” para asignar nombre a cada sub Cuenca y río.

Los datos SIG del Ministerio de Agricultura sobre uso y tipos de suelo permiten calcular en número de curva asignado un valor por cada celda. En el componente HEC-GeoHMS se utiliza la función “Subbasin Parameters from Raster” para calcular el número de curva de cada cuenca.

En el componente HEC-GeoHMS se ejecuta la función “CN Lag” para calcular el tiempo de retardo en cada subcuenca. La función “Muskingum – Cunge and Kinematic Wave Parameters” permite al usuario establecer las propiedades hidráulicas de los tránsitos presentantes en la cuenca.

El enlace de ArcGis a HEC-HMS se completa al realizar las siguientes funciones:

- a) “Maps to HMS Units”: se selecciona las capas correspondientes
- b) “Check Data”: se verifica la información y reporte indica que no se presenta ningún problema.
- c) “HMS Schematic”: se crea los esquemas de HEC-HMS
- d) “HMS Legend”: se insertan las simbologías de HEC-HMS
- e) “Add coordinates”: se agregan coordenadas geográficas a los elementos en las tablas de atributos.
- f) “Prepare Data for Model Export”: se preparan los datos para poder exportar el modelo de GIS a HMS.
- g) “Background Shape File”: se crea archivo shape que servirá de mapa en el Proyecto HEC-HMS.

3.1.4. HEC-HMS¹⁷


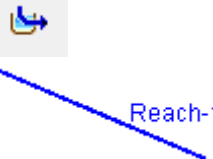





El programa HEC-HMS (Hydrological Engineering Center – Hydrologic Modeling System), fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica de la Armada de Estados Unidos con el propósito de simular la respuesta hidrológica de una cuenca a un evento dado. El programa fue diseñado para resolver una variedad de problemas en diferentes condiciones geográficas, incluyendo cuencas de gran tamaño, cuencas urbanas y cuencas naturales. Los hidrogramas producidos por el programa pueden ser utilizados de manera directa o en conjunto con otros programas para elaborar estudios de disponibilidad de recursos hídricos, drenaje urbano, pronóstico de inundaciones, impacto de urbanizar el área, diseño de embalses, control de inundaciones entre otros. La interfaz está organizada de tal forma en que HEC-HMS está dividido en, modelo de cuenca, modelo meteorológico, especificaciones de control y entrada de datos.

¹⁷ Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Quick Start Guide version 3.5. August 2010
http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_QuickStart_Guide_3.5.pdf

3.1.4.1. Modelo de la Cuenca

El modelo de la cuenca es la representación esquemática representativa de la cuenca física por medio del empleo de elementos hidrológicos. El programa considera los elementos detallados en la Tabla 6:

Tabla 6: Elementos y descripción HEC-HMS

Elemento/Símbolo	Descripción
Sub Cuenca 	Representación de la sub cuenca física. Dada la precipitación, el flujo es calculado restando las pérdidas, transformando los excedentes de precipitación en escorrentía y sumando el flujo básico
Tramos de Tránsito 	Representa el flujo aguas abajo. El flujo de entrada es provisto por el elemento aguas arriba. Su flujo de salida es calculado tomando en cuenta el método del tránsito seleccionado.
Uniones 	Se utiliza para combinar tramos aguas arriba. El flujo de entrada es provisto por uno o más elementos aguas arriba. Su flujo de salida es calculado sumando los flujos de entrada y asumiendo que no hay almacenamiento.
Fuentes 	Se utiliza para introducir flujo en el modelo de la cuenca. Provee dato de salida de flujo especificado por el usuario.
Sumidero 	Se utiliza para representar el punto de cierre de la cuenca. Recibe los datos de flujo entrante de uno o más elementos aguas arriba.
Embalses 	Se utiliza para modelar la retención de un hidrograma causado por un tipo de embalse. Recibe los datos de flujo entrante de uno o más elementos aguas arriba y el flujo de salida se calcula según el método seleccionado por el usuario.
Derivaciones 	Se utiliza para modelar flujo que deja de circular por el canal principal. Recibe los datos de flujo de entrada de uno o más elementos aguas arriba. Tiene dos flujos de salida, el derivado y el que permanece en el canal. El usuario debe proveer el dato de flujo derivado.

Información tomada de Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Quick Start Guide version 3.5. August 2010. Traducción libre: Br. Rivas Albuquerque. Tabla elaborada por Br. Hernández Vega.

HEC-HMS v 3.5 dispone de una serie de métodos para calcular las pérdidas, tránsito y flujo base con el fin de determinar el caudal de salida. Estos modelos son:

Tabla 7: Tipos de Pérdidas y sus Métodos

<i>Tipo</i>	<i>Método</i>
Pérdidas	Déficit y tasa constante Inicial y tasa constante Exponencial Número de curva CN SCS Green y Ampt Consideración de la humedad del suelo (SMA) DC por celdas CN SCS por celdas SMA por celdas
Transformación lluvia - caudal	Hidrograma Unitario (HU) de Clark Onda cinemática ModClark HU SCS HU Snyder HU Especificado por el usuario Hidrograma en S del usuario
Flujo Base	Recesión restringida Constante Mensual Depósito Lineal Recesión

Información tomada de Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Quick Start Guide version 3.5. August 2010. Traducción libre: Br. Rivas Albuquerque. Tabla elaborada por Br. Hernández Vega.

3.1.4.2. Modelo Meteorológico

La función del modelo meteorológico es calcular la precipitación de cada sub cuenca. Este modelo puede utilizar precipitaciones puntuales o por celdas y a la vez modelar precipitación sólida y líquida junto con la evapotranspiración.

Los métodos incluido se detallan en la Tabla 8:

Tabla 8: Tipos de Datos y sus Métodos

<i>Series temporales de datos</i>	<i>Pares de datos</i>	<i>Datos por celdas</i>
Pluviómetros	Funciones de almacenamiento-caudal	Precipitación
Medidores de Caudal	Funciones cota – almacenamiento	Temperatura
Limnímetros	Funciones cota – área	Radiación solar
Termómetros	Funciones caudal – derivación	Coeficiente de cultivo
Medidores de radiación solar	Secciones transversales	Capacidad de almacenamiento
Medidores de coeficiente de cultos	Hidrogramas unitarios	Tasa de percolación
	Curvas de porcentajes	Coeficientes de almacenamiento
	Funciones de fusión de nieve	Déficit de humedad
	Patrones de tasa de función de nieves	Área impermeable
		CN – SCS
		Cotas
		Equivalente de aguas de nieve
		Contenido de agua
		Tasa de fusión de nieve

Información tomada de Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Quick Start Guide version 3.5. August 2010. Traducción libre: Br. Rivas Albuquerque. Tabla elaborada por Br. Hernández Vega.

3.1.4.3. Especificaciones de control

Las especificaciones de control establecen la duración de la simulación e incluye la hora de comienzo y fin del proyecto.

3.1.4.4. Entrada de datos

La entrada de datos puede corresponder a datos de series temporales, pares de datos y datos por celdas. Estos datos son utilizados como parámetros de contorno en el modelo de cuenca y el modelo meteorológico. Los mismos pueden ser introducido a mano o bien referenciarse al registro HEC – Data Storage System (HEC – DSS). En el caso de los datos por celdas estos deben ser referenciados a un HEC-DSS existente. Los componentes de los datos se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9: Método de Entrada de Dato y su Descripción

<i>Método</i>	<i>Descripción</i>
Tormenta asociada a frecuencia	Se usa para desarrollar un evento de precipitación donde los volúmenes correspondientes a distintas duraciones tienen una probabilidad de excedencia consistente.
Pluviómetros con peso	Aplica pesos definidos por el usuario a los pluviómetros que el usuario desee.
Precipitación por celdas	Permite usar productos por precipitación por celdas, como por ejemplo los datos de Radar.
Inversa de la distancia	Calcula la precipitación media en una sub cuenca aplicando una ponderación basado en la inversa de la distancia al cuadrado.
Tormenta del SCS	Aplica una distribución temporal tipo SCS aun volumen total de lluvia en 24 horas.
Hietograma especificado	Aplica un hietograma definido por el usuario a un elemento de sub cuenca.
Tormenta de proyecto estándar.	Aplica una distribución temporal a un volumen índice de precipitación. Válido únicamente para los Estados Unidos.

Información tomada de Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Quick Start Guide version 3.5. August 2010. Traducción libre: Br. Rivas Albuquerque. Tabla elaborada por Br. Hernández Vega.

3.1.4.5. Resultados

Los resultados se obtienen de un corrida “Run” en donde HEC-HMS realiza todo el modelo hidrológico y genera un caudal de descarga, permitiendo al usuario hacer uso de distintos reportes que genera.

3.2. ANÁLISIS HIDRÁULICO¹⁸

El diseño o evaluación de las dimensiones de la obra transversal se hace por medio de un análisis hidráulico cuyo objetivo principal es determinar la sección hidráulica más adecuada que permita el paso libre del flujo que transporta el cauce en análisis. Por lo tanto, se debe tener el levantamiento topográfico, el cual debe ser planimétrico y altimétrico. Entre las obras de drenaje transversal se tienen las alcantarillas y los puentes.

3.2.1. Introducción al Modelo HEC-RAS

Hydrologic Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS) es un programa que realiza la modelación hidráulica de cauces abiertos, ríos y canales artificiales de régimen permanente y no permanente con el propósito de facilitar el cálculo de los perfiles de agua y de los parámetros hidráulicos del cauce. HEC-RAS puede modelar una red de ríos o un solo río y realizar análisis de régimen subcrítico, supercrítico o una mezcla de ambos.

HEC-RAS realiza la:

- ✓ Delimitación de fajas marginales de los ríos
- ✓ Predicción de áreas de inundación y mitigación del mismo río o sistema para diferentes períodos de retorno
- ✓ Determinación de las variables hidráulicas para el diseño de estructuras en los ríos como lo son puentes y alcantarillas entre otros.
- ✓ Determinación de la altura óptima en el diseño de una carretera que puede ser afectado por el caudal del río.

¹⁸ US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Davis, California. 2010

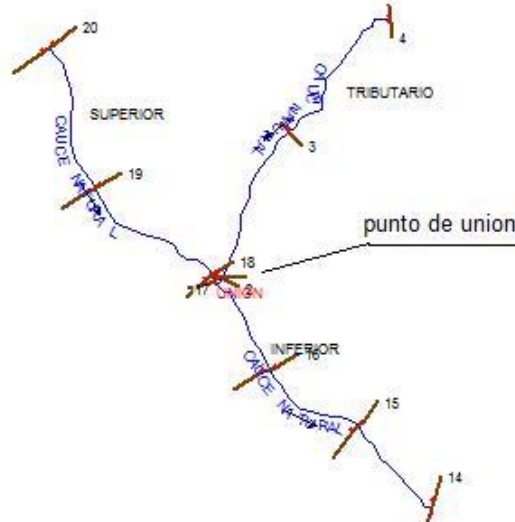
3.2.2. Componente de Datos Geométricos

Los datos geométricos consisten en establecer un esquema del sistema de río, los datos de las secciones transversales, la longitud del tramo, los coeficientes de pérdida de energía por fricción debido a contracción y expansión, la información de de las conexiones de flujo en los tramos del río o cauce y los datos de la estructura de hidráulica que estén localizados en el tramo del río o cauce.

3.2.2.1. Sistema Esquemático del Río o Cauce

En HEC-RAS cualquier conjunto de datos geométricos debe tener un sistema esquemático del río o cauce el cual es desarrollado por un dibujo y conectados por varios tramos. El esquema de río o cauce se realiza para definir el extremo de aguas arriba como el extremo de aguas debajo de esta forma introducir los datos geométricos de las secciones que conforman el cauce o el río. La conectividad de los tramos es lo que permite al modelo comprender el sistema de drenaje y los cálculos de un tramo a otro que conllevan. El dibujo del tramo se realiza de aguas arriba hacia aguas abajo para dar dirección al flujo. La conexión de los tramos se hace a través de una unión que es un punto donde dos o más flujos convergen o se dividen.

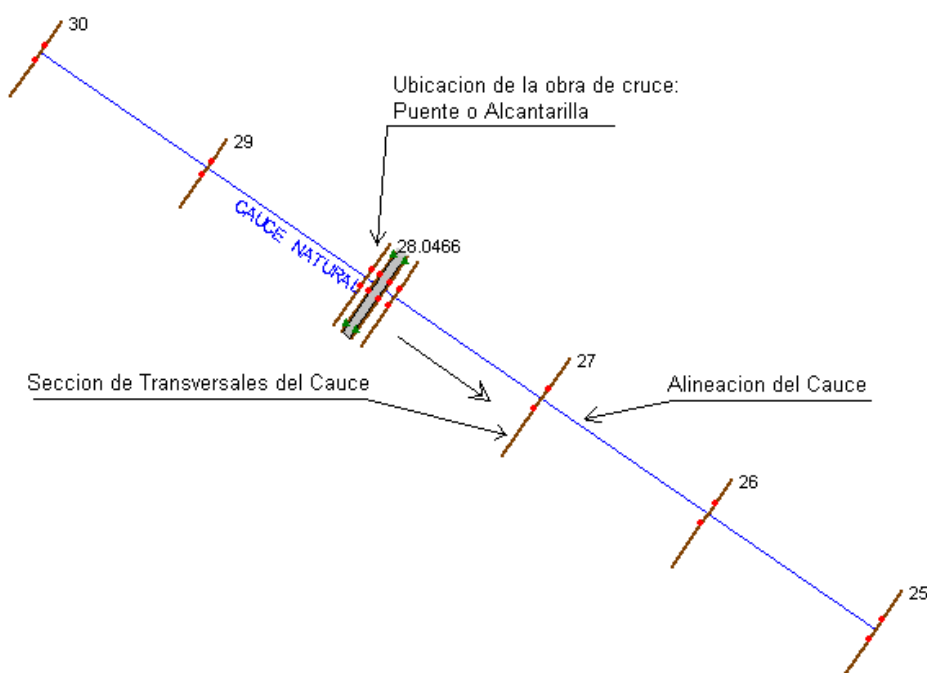
Figura 16: Sistema Esquemático de un río



Tomado de US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Davis, California. 2010

Los datos geométricos de los tramos son diversas secciones transversales a lo largo del cauce secciones transversales a lo largo del cauce o cauces considerados incluyendo secciones aguas arriba y aguas abajo referentes a una estructura hidráulica. Las secciones transversales se introducen utilizando la cota del terreno de varios puntos, cuya distancia de separación es conocida. El sistema numérico para cada sección debe ser consistente tomando en cuenta que HEC-RAS asume que los valores altos corresponden a las secciones aguas arriba mientras que los valores bajo corresponden a las secciones aguas abajo.

Figura 17: Esquema del Cauce: Flujo del Río, Secciones Transversales y Obra de Cruce



Tomado de US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Davis, California. 2010

3.2.2.2. Secciones Transversales del Río o Cauce

Las condiciones geométricas para el análisis de flujo en corrientes naturales son especificadas en términos de la superficie del terreno, de la sección transversal y las distancia entre ellas. Las secciones transversales se localizan a intervalos cuyo valor depende de la caracterización de la corriente, el flujo central del cauce y de las planicies de inundación.

La sección transversal se describen por medio de la estación y la elevación utilizando pares ordenados (x,y) de izquierda a derecha partiendo de aguas arriba hacia aguas abajo. En la columna “station” se introduce la distancia desde el margen izquierdo y en la columna “elevation” se introduce la cota del terreno de fondo de cauce en ese punto.

Figura 18: Ejemplo Cuadro de Diálogo HEC-RAS para datos de Sección Transversal

	Station	Elevation
1	0	102.135
2	3.34	102.25
3	3.44	102.253
4	8.283	102.418
5	8.302	102.419
6	8.442	102.425
7	10.63	102.5
8	11.341	102.504
9	12.923	102.506
10	13.017	102.507
11	13.106	102.507

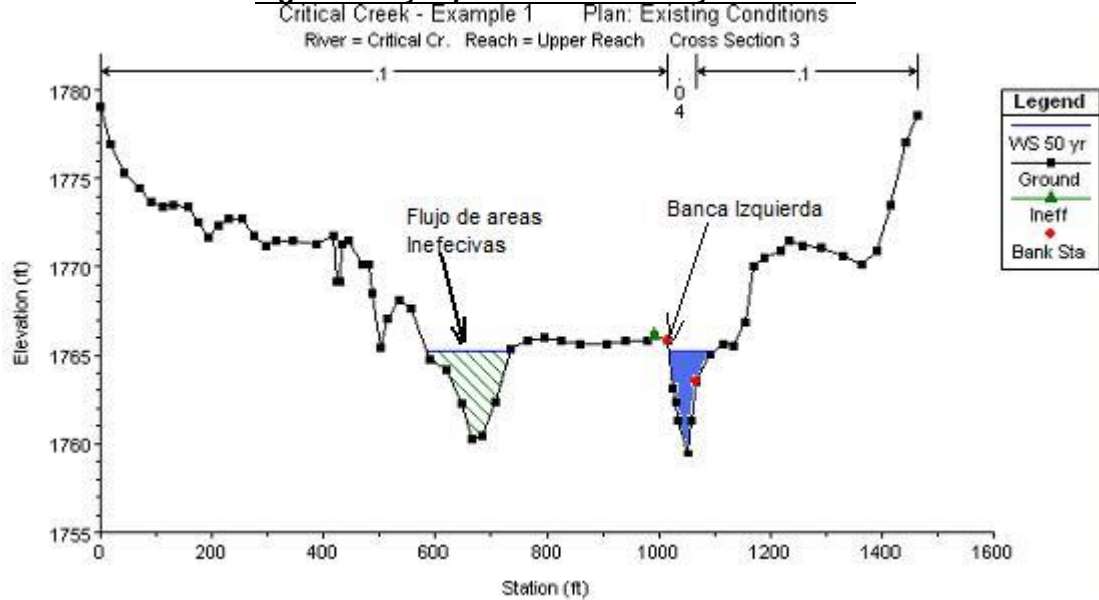
Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el cauce y puente en Estudio

Al ser HEC-RAS un modelo hidráulico se deben considerar en cada sección la distancia entre márgenes tanto izquierdos como derechos y la distancia a lo largo del centro del cauce con respecto a la sección aguas abajo inmediata, así como los valores del coeficiente de Manning en los márgenes y al centro del cauce. De la misma forma HEC-RAS necesita los puntos donde inicia la planicie de inundación, los cuales acotarán el canal principal.

3.2.2.3. Áreas de Flujo Inefectivo

Las secciones transversales con flujo inefectivo son aquellas elevaciones más bajas que los bancos del cauce o río, que no contribuyen efectivamente a transportar el agua en la sección transversal del cauce o río. Las áreas de flujo inefectivo son zonas de la sección transversal donde el agua se estanca debido a que la elevación del banco es mayor que el nivel del agua en el cauce adyacente. Realizar la selección de las selecciones transversales con flujo inefectivo evita un error en la altura de la superficie del agua, ya que de no hacerlo HEC RAS asume que en esta porción de sección existe transporte de agua.

Figura 19: Ejemplo de Áreas de Flujo Inefectivo



Tomado de US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Davis, California. 2010

3.2.2.4. Coeficientes de Contracción y Expansión

Un cauce en muchas ocasiones presenta secciones irregulares ocasionando pérdidas de energía entre las secciones contiguas. Estas pérdidas se calculan con las siguientes fórmulas

$$hp = LS_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

Donde

L: Longitud del cauce en peso de la descarga

Sr: Gradiente Hidráulico entre las secciones contiguas.

C: Coeficientes de pérdidas por expansión o contracción.

Donde

L: Longitud del cauce en peso de la descarga

L_{BI} , L_C , L_{BD} : Longitudes específicas del caudal en el cauce considerando la banca izquierda, línea central y la banca derecha.

\bar{Q}_{BI} , \bar{Q}_C , \bar{Q}_{BD} : Promedio aritmético de caudales entre las secciones contiguas correspondiente a la banca izquierda, la línea central y la banca derecha del cauce.

$$L = \frac{L_{BI} \bar{Q}_{BI} + L_C \bar{Q}_C + L_{BD} \bar{Q}_{BD}}{\bar{Q}_{BI} + \bar{Q}_C + \bar{Q}_{BD}}$$

HEC-RAS determina que una contracción ocurre cuando la carga de velocidad aguas abajo es grande con respecto a la carga de velocidad aguas arriba, caso contrario determina una expansión. Los valores típicos de contracción y expansión para flujo sub crítico son:

Tabla 10: Coeficientes de Contracción y Expansión en Flujo sub críticos

Transición	Contracción	Expansión
Sin pérdidas	0.0	0.0
Gradual	0.1	0.3
Sección típica de puente	0.3	0.5
Transiciones abruptas	0.6	0.8

Tomado de US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Davis, California. 2010

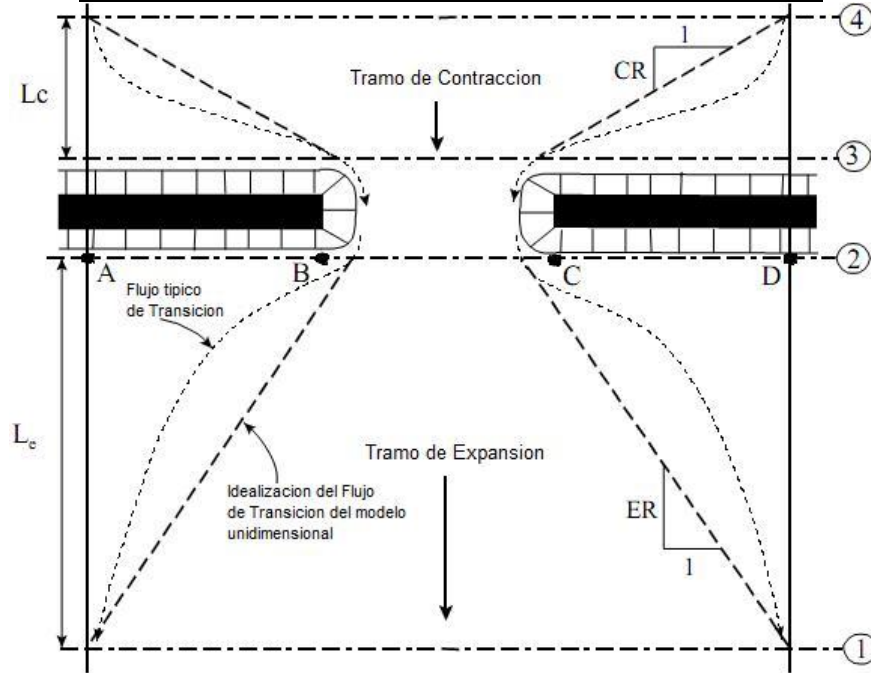
El valor máximo de los coeficientes de contracción y expansión es igual a la unidad. En general, los coeficientes empíricos de contracción y expansión pueden ser bajos en un flujo supercrítico, debido a su carga de velocidad que es muy grande, y el pequeño cambio en su profundidad puede causar cambios prolongados en su carga de velocidad.

3.2.3. Ubicación de las Secciones Transversales

Un puente en ocasiones implica invadir parte del río o cauce lo cual conlleva un estrechamiento de su sección transversal produciéndose cambios en la velocidad del flujo y en la pendiente hidráulica de la corriente en que se construye. Un estrechamiento ocasiona los siguientes efectos:

- a) Sobre elevación llamada remanso aguas arriba de la contracción pudiendo provocar inundaciones.
- b) Aumento de la energía cinética del flujo que ocasiona socavaciones

Figura 20: Ejemplo de Modelación Hidráulico de un Puente



Tomado de US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Davis, California. 2010

3.2.3.1. Primera Sección transversal 1-1

Sección localizada aguas abajo de la estructura donde el flujo está totalmente expandido. En esta sección se inicia la expansión del flujo con un régimen gradualmente o rápidamente variado retardado y a partir de esta sección se restablecen las condiciones de flujo uniforme.

3.2.3.2. Longitud de Expansión L_e

La longitud de expansión es la distancia entre el extremo aguas abajo del puente y la primera sección transversal. La longitud de expansión depende del grado, de la forma de contracción y la magnitud del flujo y de la velocidad del flujo. El cálculo de la longitud de expansión utiliza la siguiente ecuación:

Donde:

RE : razón de expansión

L_{obs} – longitud promedio de obstrucción lateral del puente

$$L_e = RE L_{obs}$$

$$L_{obs} = \frac{\overline{AB} + \overline{CD}}{2}$$

Tabla 11: Rangos Coeficientes de Razón de Expansión

b/B	S ft/mile	nob / nc = 1	nob / nc=2	nob / nc = 4
0.1	1	1.4 – 3.6	1.3 – 3.0	1.2 – 2.1
	5	1.0 – 2.5	0.8 – 2.0	0.8 – 2.0
	10	1.0 – 2.2	0.8 – 2.0	0.8 – 2.0
0.25	1	1.6 – 3.0	1.4 – 2.5	1.2 – 2.0
	5	1.5 – 2.5	1.3 – 2.0	1.3 – 2.0
	10	1.5 – 2.0	1.3 – 2.0	1.3 – 2.0
0.50	1	1.4 – 2.6	1.3 – 1.9	1.2 – 1.4
	5	1.3 – 2.1	1.2 – 1.6	1.0 – 1.4
	10	1.3 – 2.0	1.2 – 1.5	1.0 – 1-4

Tomado de US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Davis, California. 2010

3.2.3.3. Segunda Sección Transversal 2-2

Sección que representa el terreno natural localizada muy cerca aguas abajo al pie del terraplén del puente para analizar las pérdidas de energía a través de este. Esta sección no debe ser localizada inmediatamente aguas abajo del tablero del puente, en general se recomienda una distancia aguas abajo de un metro del tablero del puente. En puentes que carecen de terraplenes la segunda sección transversal puede localizadas suficientemente lejos aguas abajo del tablero del puente que permita una distancia suficiente para la expansión del flujo debido a las pilas, o un flujo a compresión desde el puente. Esta sección presenta las siguientes características:

- a) Menor profundidad de flujo
- b) Inicio del retardo del flujo.
- c) Aguas abajo de la misma presentan remolinos de agua

3.2.3.4. Tercera Sección Transversal 3-3

Sección transversal localizada a pocos metros aguas arriba del puente que refleja la longitud requerida para la aceleración abrupta y contracción del flujo, que ocurre en el área inmediata de la abertura del puente. Esta sección transversal deberá representar el terreno natural o el área del canal y de la planicie de inundación justamente aguas arriba del terraplén del puente.

La tercera sección transversal representa un ancho mínimo del flujo. Esta sección presenta las siguientes características:

- a) El flujo se separa de las fronteras sólidas siendo la contracción del flujo mayor que el ancho de la abertura
- b) Entre las secciones (2-2) y (3-3) surgen las pérdidas por contracción que ocurre justamente aguas arriba de la estructura del puente

3.2.3.5. **Cuarta Sección Transversal 4-4**

Sección transversal donde las líneas de flujo son aproximadamente paralelas y la sección transversal es totalmente efectiva. Sección aguas arriba hasta donde influye el remanso y posiblemente termina el flujo uniforme en el cauce de aproximación y comienza un flujo gradualmente variado, donde se inicia la contracción del flujo.

3.2.3.6. **Longitud de Contracción L_c**

La longitud de contracción del puente es la distancia entre el extremo de aguas arriba del puente y la primera sección transversal. La longitud de contracción dependerá mucho del grado, de la forma de contracción y la magnitud del flujo, y de su velocidad.

$$L_c = RC L_{obs}$$

Donde
 RC: Razón de contracción
 Lobs: Longitud promedio de la obstrucción lateral del Puente.

Tabla 12: Rangos Coeficientes de Razón de Contracción

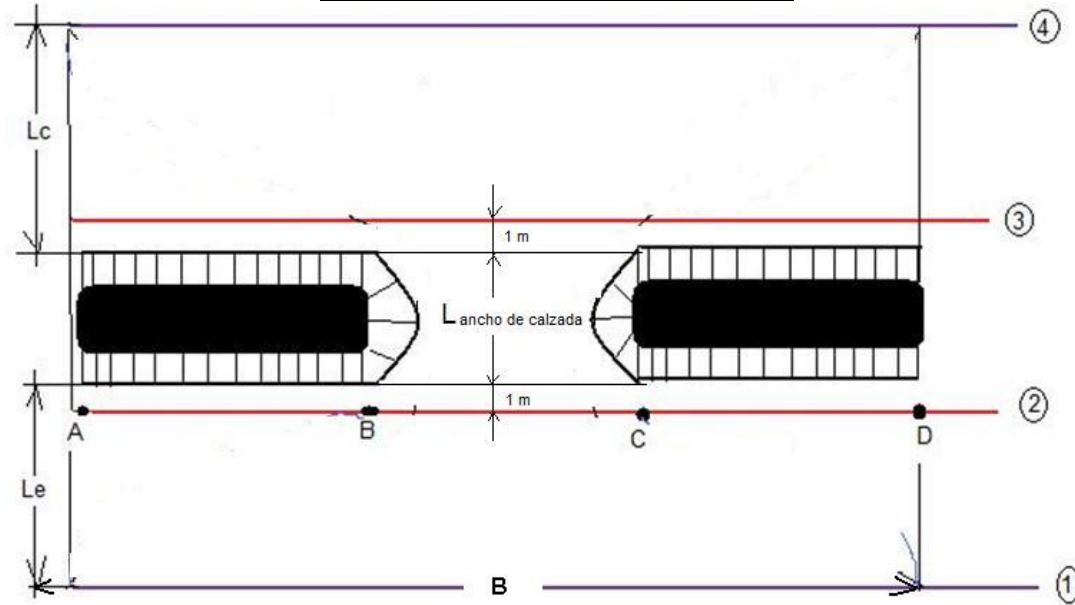
S ft/mile	nob / nc = 1	nob / nc=2	nob / nc = 4
1	1.0 – 2.3	0.8 – 1.7	0.7 – 1.3
5	1.0 – 1.9	0.8 – 1.5	0.7 – 1.2
10	1.0 – 1.9	0.8 – 1.4	0.7 – 1.2

Tomado de US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Davis, California. 2010

3.2.4. Longitudes Entre las Secciones Relativas del Puente

Las longitudes entre las secciones relativas son las distancias que hay entre las diferentes secciones, con características del flujo propio de cada segmento.

Figura 21: Esquema de las secciones



Tomado de US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Davis, California. 2010

3.2.4.1. Longitud entre la sección 2-2 y la sección 1-1

La longitud sería:

$$L_{2-1} = L_e - 1$$

Entre las secciones 2 y 1, el flujo es gradualmente o rápidamente variado retardado.

3.2.4.2. Longitud entre la sección 3-3 y la sección 2-2

La longitud sería:

$$L_{3-2} = 1 + L_{\text{ancho de calzada}} + 1$$

Entre las secciones 3 y 2, el flujo es como el que se produciría al pasar por un orificio.

3.2.4.3. Longitud entre la sección 4-4 y la sección 3-3

La longitud sería:

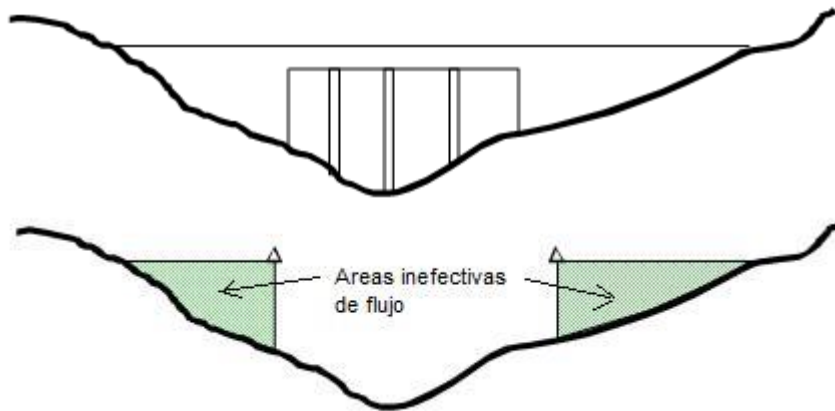
$$L_{4-3} = L_c - 1$$

Entre las secciones 4 y 3, el flujo de gradualmente variado a rápidamente variado acelerado.

3.2.5. Áreas de Flujo Inefectivo en la Ubicación del Puente

Área de la sección transversal en que el agua se acumula, pero no está siendo efectivamente transportada.

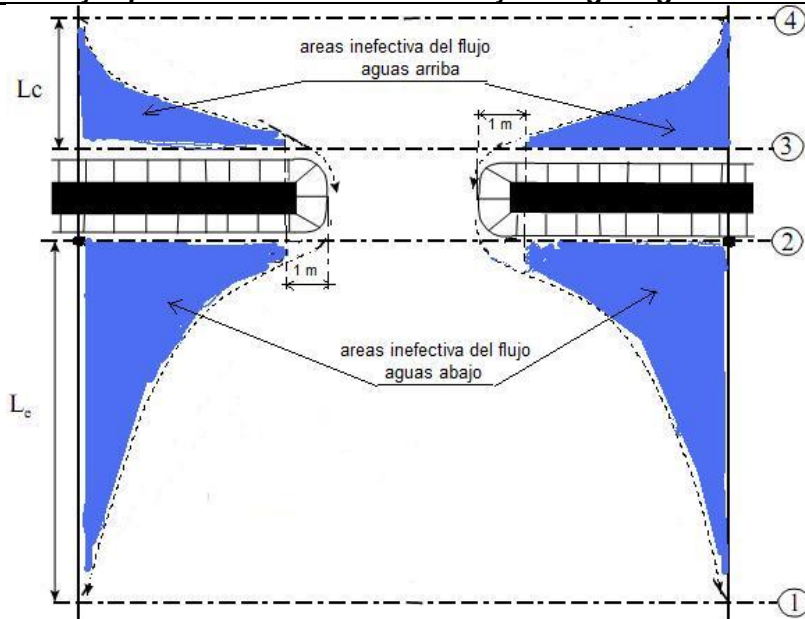
Figura 22: Ejemplo de porciones de áreas inefectivas de flujo secciones 2-2 y 3-3



Tomado de US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Davis, California. 2010

En un puente las áreas inefectivas normalmente ocurren aguas arriba y aguas abajo del dique de la vía, fuera de la apertura del puente ocasionando áreas inefectivas de flujo aguas abajo y aguas arriba.

Figura 23: Ejemplo de Área Inefectiva del Flujo de Agua aguas arriba y abajo



Tomado de US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Davis, California. 2010

3.2.6. Datos Geométricos del Puente

3.2.6.1. Ubicación del Puente

El puente se ubica entre las estaciones de las secciones 3-3 y 2-2, la cual se puede elegir una estación intermedia entre estas secciones o el promedio de estas estaciones.

3.2.6.2. Condiciones de borde

Las condiciones de borde son necesarias para establecer la superficie de agua inicial en los extremos aguas arriba y aguas abajo del cauce o río. Para iniciar los cálculos se necesita la superficie de agua inicial. Hay que tomar en consideración las siguientes condiciones:

- a) Flujo sub crítico: las condiciones de borde son necesarias solamente en el extremo aguas abajo.
- b) Flujo supercrítico: las condiciones de borde deben ser introducidas solamente en el extremo aguas arriba.
- c) Flujo mixto: las condiciones de borde deben introducirse en todos los extremos.

3.2.6.3. Información de descarga

La información de descarga se requiere en cada sección para poder calcular el perfil de superficie de agua. Los datos de descarga se introducen desde aguas arriba hacia aguas abajo para cada tramo, por lo menos un valor de flujo debe ser ingresado para cada tramo.

3.2.6.4. Coeficiente de rugosidad de Manning

El coeficiente de rugosidad de Manning es muy variable y depende de una cantidad de factores como rugosidad de la superficie, la variación de la vegetación del canal de acuerdo a la época del año, irregularidades del cauce, alineamiento del canal, depósitos y socavaciones, obstrucciones, tamaño y forma del canal, nivel y caudal, cambio estacional, material suspendido y transporte del fondo.

a) Rugosidad Superficial

La rugosidad superficial se representa por el tamaño y la forma de los granos del material que forman el perímetro mojado y que producen un efecto retardador del flujo. En general, granos finos (arena, arcilla, limo) dan como resultado un valor relativamente bajo de n , y granos gruesos (gravas), un valor alto de n . Por tanto, el efecto retardador en materiales finos es mucho menor que en materiales gruesos. Pueden clasificarse como:

- ✓ Ligerero: Para la mejor superficie que se puede alcanzar con un material dado.
- ✓ Menor: Para canales bien dragados, ligeramente erosionados o con taludes ligeramente socavados.
- ✓ Moderados: Para canales de pobre a regularmente dragados o con taludes moderadamente erosionables o reblandecidos.
- ✓ Severo: Para cauces naturales fuertemente reblandecidos o canales muy erosionables, también para canales excavados en roca con superficie muy irregular.

b) Irregularidad del Canal

En Canales naturales las irregularidades son por lo general el resultado de depósitos o sedimentos; sin embargo, cuando la variación es gradual el coeficiente n de Manning no se ve afectado significativamente, pero cuando se

presentan cambios abruptos se puede generar un valor de n mucho mayor. Pueden clasificarse como:

- ✓ Gradual: si la sección cambia gradualmente en tamaño y forma.
- ✓ Ocasional: cuando grandes y pequeñas secciones están alternadas ocasionalmente, o cuando cambios de forma causan ocasionalmente movimientos del flujo principal de un lado a otro.
- ✓ Frecuente: cuando hay grandes y pequeñas secciones alternadas frecuentemente o cuando los cambios de forma causan movimientos frecuentes en el flujo principal de un lado a otro.

c) Vegetación

La vegetación puede considerarse como una clase de rugosidad superficial, pero también reduce de manera notable la capacidad del canal y retarda el flujo. Este efecto depende por completo de la altura, la densidad, la distribución y del tipo de vegetación. El efecto de la vegetación puede clasificarse como:

✓ Bajo:

Gramma o maleza densa, de la cual el tipo bermuda y azul son típicas y donde la profundidad del flujo es dos o tres veces la altura de la vegetación.

Retoños de árboles o arbustos, donde la profundidad de flujo es tres o cuatro veces la altura de la vegetación.

✓ Medio

Gramma, donde la profundidad del flujo es una o dos veces la altura de la vegetación.

Tallos y retoños de árboles con cobertura moderadas, donde la profundidad de flujo es dos o tres veces la altura de la vegetación.

Vegetación de monte moderadamente denso a lo largo de las paredes de un canal sin vegetación significativa a lo largo del fondo, donde el radio hidráulico es mayor de 60 cm.

✓ Alto

Gramma, donde la profundidad promedio de flujo es aproximadamente igual a la altura de la vegetación.

Arboles pequeños o arbustos junto con vegetación de monte con poco follaje y radio hidráulico mayor de 60 cm

Arbustos y árboles como sauces de un año con montes en completo follaje a lo largo de las paredes, sin vegetación significativamente en el fondo y con radio hidráulico mayor de 60 cm.

✓ Muy Alto

Gramma, donde la profundidad promedio de flujo sea menor que la mitad de la altura de la vegetación.

Arbustos y árboles como sauces de un año, con montes en completo follaje en las paredes y a lo largo del fondo, con cualquier valor del radio hidráulico hasta 5 cm.

d) Alineamiento del Canal

Un alineamiento con curvas suaves producirá valores de Manning relativamente bajos en tanto curvas abruptas incrementarán el valor de Manning. La sinuosidad se considera:

- ✓ menor para valores de 1.0 a 1.2,
- ✓ apreciable para valores de 1.2 a 1.5 y
- ✓ severa para valores iguales o mayores que 1.5.

e) Sedimentación y Socavación

La sedimentación puede llegar a convertir un canal muy irregular en un canal relativamente uniforme, llevando a una disminución en el coeficiente de Manning. En tanto la socavación puede hacer lo contrario llevando a un aumento en el coeficiente.

f) Obstrucciones

Las obstrucciones tales como troncos de árbol, desechos de flujo, atascamientos, alcantarillas, y pilas de puentes entre otros tienden a incrementar el valor del coeficiente de Manning en dependencia de la naturaleza del obstáculo.

g) Tamaño y Forma del Canal

Un aumento en el radio hidráulico puede aumentar o disminuir el coeficiente de Manning, aunque no existe evidencia definitiva acerca del tamaño y la forma del canal como factores importantes que afecten el coeficiente de Manning.

h) Nivel y Caudal

Tomando en cuenta las siguientes características hay distintas afectaciones al coeficiente de Manning.

- ✓ El coeficiente tiende a disminuir en muchos canales al aumentar el nivel del agua y la descarga.
- ✓ El coeficiente puede ser grande, no solo a pocas profundidades sino también en niveles altos si las bancas son rugosas, pastosas o cubiertas de hierba.
- ✓ El coeficiente varía en inundaciones en dependencia de la profundidad de la inundación
- ✓ El coeficiente puede suponerse constante en canales artificiales debido a que el lecho y las bancas son igualmente suaves y regulares y la pendiente del fondo es uniforme.

i) Cambio Estacional

Debido al crecimiento estacional de plantas acuáticas, hierbas, malezas, sauces y árboles en el canal o en las bancas, el valor del coeficiente de Manning puede aumentar en la estación de crecimiento y disminuir en la estación inactiva. Este cambio estacional puede producir cambios en otros factores.

j) Material en Suspensión y Carga de Lecho

El material en suspensión y la carga del lecho, ya sea en movimiento o no, consumirá energía y causará una pérdida de altura e incrementará la rugosidad aparente del canal.

Figura 24: Tabla de Coeficientes de Manning

Descripción de la corriente	Mínimo	Normal	Máximo
A Cauces naturales			
A.1 Cursos secundarios (ancho de la superficie libre en crecida < 30 m)			
A.1.1 Cursos en planicies			
- Limpios, rectos, sin fallas ni pozos	0,025	0,030	0,033
- Rectos con algunas piedras y pastos	0,030	0,035	0,040
- Limpios con meandros, con algunos pozos y bancos	0,033	0,040	0,045
- Meandros con algunas piedras y pastos	0,035	0,045	0,050
- Meandros con muchas piedras	0,045	0,050	0,060
- Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0,050	0,070	0,080
- Tramo con mucho pasto, pozos profundos y cauce en crecida con muchos arbustos y matorral	0,075	0,100	0,150
A.1.2 Cursos montañosos, carentes de vegetación en el fondo, laderas con pendientes pronunciadas y árboles y arbustos en las laderas que se sumergen en niveles de crecida			
- Cauce de grava, cantos rodados y algunas rocas	0,030	0,040	0,050
- Cauce de cantos rodados, con grandes rocas	0,040	0,050	0,070
A.2 Cursos en planicies inundadas			
A.2.1 Zonas de pastos, sin arbustos			
- Pasto corto	0,025	0,030	0,035
- Pasto alto	0,030	0,035	0,050
A.2.2 Zonas cultivadas			
- Sin cultivo	0,020	0,030	0,030
- Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica	0,025	0,035	0,045
- Cultivos sembrados a voleo en fase de madurez fisiológica	0,030	0,040	0,050
A.2.3 Zonas arbustivas			
- Escasos arbustos y pasto abundante	0,035	0,050	0,070
- Pequeños árboles y arbustos sin follaje (parada invernal)	0,035	0,050	0,060
- Pequeños árboles y arbustos con follaje (fase vegetativa)	0,040	0,060	0,080
- Arbustos medianos a densos durante la parada invernal	0,045	0,070	0,110
- Arbustos medianos a densos durante la fase vegetativa	0,070	0,100	0,160
A.2.4 Zonas arbóreas			
- Sauces densos, temporada invernal	0,110	0,150	0,200
- Terreno claro con ramas sin brotes	0,030	0,040	0,050
- Terreno claro con ramas con gran crecimiento de brotes	0,050	0,060	0,080
- Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación por debajo de las ramas	0,080	0,100	0,120
- Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación que alcanza a las ramas	0,100	0,120	0,160
A.3 Cursos importantes (ancho de la superficie libre en crecida > 30 m)			
En este caso, los valores del coeficiente n son inferiores a los correspondientes de cauces secundarios análogos, ya que los bancos ofrecen una resistencia efectiva menor,			
- Sección regular sin rocas ni arbustos	0,025		0,060
- Sección irregular y rugosa	0,035		0,100

Tomado de US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Davis, California. 2010

3.3. ANÁLISIS DE SOCAVACIÓN¹⁹

El cálculo de la socavación en puentes a través de HEC-RAS está basado en los métodos expuestos en la publicación Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC No. 18, FHWA, 2001).

3.3.1. Modelo

Se parte del desarrollo de un modelo hidráulico del tramo del río en el cual se encuentra el puente analizado con suficientes secciones transversales aguas abajo del puente, de modo tal que cualquier condición aguas abajo no afecte los resultados hidráulicos dentro del puente, así como inmediatamente aguas arriba del puente, para evaluar los efectos del puente en el perfil de la superficie de agua aguas arriba. Al concluir desarrollados los cálculos del perfil de la superficie de agua para el evento de diseño, la socavación del puente puede ser evaluada.

La socavación total contiene los siguientes componentes, agradación y degradación a largo plazo; socavación por contracción; y socavación local en pilas y estribos. HEC-RAS permiten evaluar la socavación por contracción y la socavación local en pilas y estribos.

3.3.2. Socavación por Contracción

3.3.2.1. *Condición para determinar Socavación con Contracción con Lecho Vivo o con Agua Clara*

El modelo calcula la velocidad crítica para inicio de la remoción V_c y la compara con la velocidad V del flujo en el canal principal o en el área de los márgenes aguas arriba del puente en la sección transversal próxima. El criterio de selección es:

a) Agua Clara:

$V_c > V$ es decir la velocidad crítica del material de lecho es mayor que la velocidad en la sección próxima.

¹⁹ US Department of Transportation, Federal Highway Administration. Evaluating Scour at Bridges. 2012 <http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/hif12003.pdf>

b) Lecho Vivo:

$V_c < V$ es decir la velocidad crítica del material de lecho es menor que la velocidad en la sección próxima

La velocidad crítica se calcula empleando la ecuación de Laursen:

Donde:

V_c : Velocidad crítica sobre la cual el material de tamaño D_{50} más pequeño será transportado, en m/s

y_1 : Profundidad media del flujo en el canal principal o en el área de margen del río en la sección próxima, m

D_{50} : Tamaño de las partículas del material de lecho, en una mezcla tal que el 50% son más pequeñas, en m.

K_u : 6.19 (para Sistema Internacional)

$$V_c = K_u y_1^{1/6} D_{50}^{1/3}$$

3.3.2.2. Contracción con Lecho Vivo

Utilizar la ecuación de Laursen modificada para lecho vivo

$$y_2 = y_1 \left[\frac{Q_2}{Q_1} \right]^{1/6} \left[\frac{W_1}{W_2} \right]^{K_1}$$

$$y_s = y_2 - y_0$$

Donde:

y_s : Profundidad media de socavación por contracción en m

y_2 : Profundidad media del flujo después de la socavación en la sección contraída, en m. Esta sección es la sección interna del puente aguas arriba.

y_1 : Profundidad media del flujo en el canal principal o en el área de margen del río en la sección transversal próxima al puente aguas arriba, en m.

y_0 : Tirante medio antes de la socavación en la sección contraída, en m.

Q₁: Caudal en el canal principal en la sección transversal próxima al puente, la cual está transportando sedimentos, en m³/s.

Q₂: Caudal en la sección contraída, la cual está transportando sedimentos, en m³/s.

W₁: Ancho de la superficie de agua correspondiente al canal principal en la sección próxima al puente, en m.

W₂: Ancho de la superficie de agua correspondiente al canal principal en la sección contraída, en m.

k₁: Exponente para el modo de transporte del material de lecho

Tabla 13: Exponente K₁ para modo de transporte de material de lecho

V*/w	K₁	Modo de Transporte del material del lecho
< 0.50	0.59	Descarga material de lecho por contacto principalmente
0.50 a 2.0	0.64	Descarga algún material de lecho suspendido
>2.0	0.69	Descarga material de lecho suspendido principalmente

Tomado de US Department of Transportation, Federal Highway Administration. Evaluating Scour at Bridges. 2012

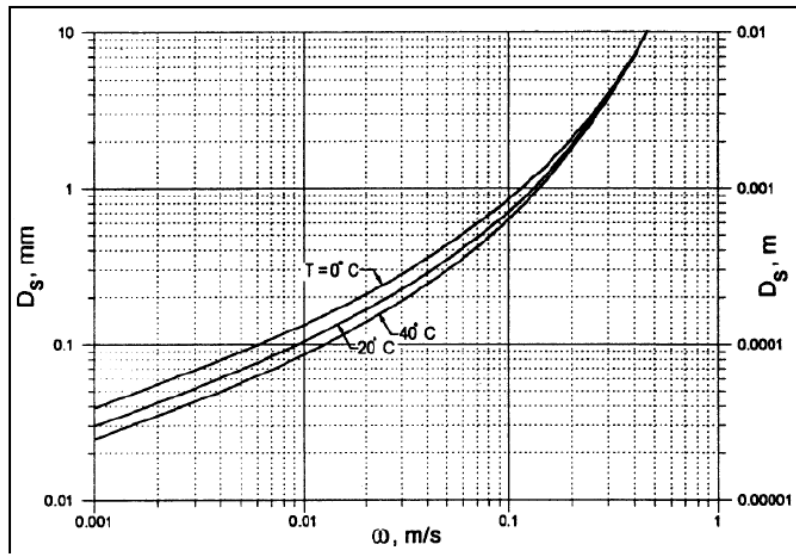
$$V * = (gy_1S_1)^{1/2}$$

Donde:

V*: velocidad cortante en el canal principal en la sección próxima al puente, m/s

ω: Velocidad de caída del material de lecho en dependencia de D50, m/s

Figura 25: Velocidad de caída w en dependencia de D_{50}



Tomado de US Department of Transportation, Federal Highway Administration. Evaluating Scour at Bridges. 2012

g : Aceleración de la gravedad, m/s^2 .

S_1 : Pendiente de la línea de energía en la sección transversal próxima al puente, m/m .

3.3.2.3. Contracción con Agua Clara

Utilizar la ecuación basada en investigación de Laursen.

$$y_2 = \left[\frac{Q_2^2}{C D_m^{2/3} W^2} \right]^{3/7}$$

$$y_s = y_2 - y_o$$

Donde

D_m : Diámetro de la partícula más pequeña no transportable en el material de lecho, en la sección, en m. $D_m = 1.25 * D_{50}$

D_{50} : Diámetro medio del material de lecho, en m. C : 40 para unidades del Sistema Internacional.

3.3.3. Socavación por Expansión

El parámetro principal para la elección de la ecuación a utilizar es la longitud definida como la distancia desde la proyección del pie del estribo en la sección próxima hasta el límite de agua en el lado correspondiente al estribo. Se utiliza el siguiente criterio

- a) Ecuación de Hire: la longitud dividida entre la profundidad de flujo en esa misma zona es mayor que 25
- b) Ecuación de Froehlich la longitud dividida entre la profundidad de flujo en esa misma zona es menor que 25

3.3.3.1. Ecuación de Hire

$$y_s = 4y_1 \left(\frac{K_1}{0.55} \right) K_2 F_1^{0.33}$$

Donde:

y_s : Profundidad de socavación, en m.

y_1 : Profundidad de flujo al pie del estribo, en m, medida en la sección interna del puente aguas arriba.

K_1 : Factor de corrección por la forma del estribo

Tabla 14: Factor de corrección por la forma del Estribo

Descripción	K1
Estribos de paredes verticales	1.00
Estribo de paredes verticales con aletones	0.82
Estribo de paredes inclinadas	0.55

Tomado de US Department of Transportation, Federal Highway Administration. Evaluating Scour at Bridges. 2012

K_2 : Factor de corrección por el ángulo de ataque (θ) del flujo con la pared del estribo. $\theta = 90$ cuando los estribos son perpendiculares al flujo, $\theta < 90$ si los estribos giran aguas abajo, y $\theta > 90$ si los estribos giran aguas arriba.

$$K_2 = \left(\frac{\theta}{90} \right)^{0.13}$$

Fr₁: Numero de Froude basado en la velocidad y profundidad adyacente justo aguas arriba al pie del estribo.

3.3.3.2. Ecuación de Froehlich

$$y_s = 2.27K_1K_2(L')^{0.43}y_aFr^{0.61} + y_a$$

Donde:

y_s: Profundidad de socavación, en m.

K₁: Factor de corrección por la forma del estribo,

Tabla 15: Factor de corrección por la forma del Estribo

Descripción	K1
Estribos de paredes verticales	1.00
Estribo de paredes verticales con aletones	0.82
Estribo de paredes inclinadas	0.55

Tomado de US Department of Transportation, Federal Highway Administration. Evaluating Scour at Bridges. 2012

K₂: Factor de corrección por el ángulo de ataque (θ) del flujo con la pared del estribo. θ = 90 cuando los estribos son perpendiculares al flujo, θ < 90 si los estribos giran aguas abajo, y θ > 90 si los estribos giran aguas arriba.

$$K_2 = \left(\frac{\theta}{90}\right)^{0.13}$$

L': Longitud del estribo (o terracería del camino) proyectado perpendicular al flujo, en m.

y_a: Profundidad media del flujo en el área correspondiente al estribo, proyectada en la sección transversal próxima al puente, en m.

Fr: Número de Froude del flujo en el área correspondiente al estribo, proyectada en la sección transversal próxima al puente.

$$Fr = \frac{V_e}{(g y_a)^{0.5}}$$

Velocidad promedio del flujo en la sección próxima al puente, en m/s.

$$V_e = \frac{Q_e}{A_3}$$

Q_e : Flujo obstruido por el estribo o la terracería del camino en la sección próxima al puente, en m³/s.

A_e : Área de flujo correspondiente al estribo en la sección próxima al puente, en m².

3.3.4. Profundidad Total de Socavación

La profundidad total de socavación es una combinación del cambio de elevación a largo plazo, socavación por contracción, y socavación por expansión. Una vez que la socavación es calculada, el programa HEC-RAS automáticamente grafica la socavación en la sección transversal del puente y genera un reporte escrito. .

4. METODOLOGÍA EMPLEADA

4.1. INFORMACIÓN

La información del tipo SIG son el Modelo Digital de Elevación (DEM) y el Tipo y Uso de Suelo para el área en estudio. El DEM se obtiene del proyecto ASTER de la NASA mientras que el tipo y uso de suelo se obtiene del Ministerio Agropecuario y Forestal, MAGFOR.

La información hidrometeorológica de la estación meteorológica seleccionada se obtiene en el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, INETER.

La información de campo consta de levantamiento topográfico del río y sus secciones transversales cada 20 metros, así como estudio de suelo.

4.2. MODELACIÓN

Se hace uso de ArcGis, HEC-HMS y HEC-RAS para completar la Evaluación Hidrotécnica del Puente Boaquito.

4.2.1. Análisis Hidrológico

En el Análisis Hidrológico se hace uso de modelo en ArcGis y de modelo en HEC-HMS.

4.2.1.2. Procesos en ArcGis

Partiendo del DEM, se procede a delimitar la cuenca del Puente Boaquito y sus ríos. La información en los archivos shape y en los vectores se utiliza para calcular los Parámetros Geomorfológicos de la Cuenca.

Haciendo uso de los archivos Tipo de Suelo y Uso de Suelo se procede a procesarlos y calcular el número de curva de cada sub cuenca.

Se decide utilizar: para método de Pérdida, SCS; para Método de Transformación, hidrograma unitario SCS y para Método del Tránsito de Avenidas, Muskingum-Cunge. Desde ArcGis se asignan los métodos a cada subcuenca y tránsito.

Se procesa toda esta información y se obtiene archivo tipo basin con toda la información de la cuenca en estudio para ser utilizado en HEC-HMS.

4.2.1.3. Procesos en HEC-HMS

En el proyecto HEC-HMS para la cuenca en estudio ya se dispone de toda la información del Modelo de Cuenca que fue generado en ArcGis.

Se calcula el tiempo de concentración de la cuenca para determinar la duración de la lluvia que se utilizará en el estudio hidrológico. En base a la Tabla 1, se selecciona un período de retorno de 100 años. Haciendo uso de las IDF se calcula el hietograma por medio del método del bloque alterno.

Se procede a:

- ✓ Crear componente de Entrada de Datos y utilizar el hietograma calculado anteriormente.
- ✓ Crear la especificación de control.
- ✓ Crear el Modelo Meteorológico y asignar la entrada de dato a cada sub cuenca.

Se concluyen los procesos en HEC-HMS realizando simulación y obteniendo los resultados.

4.2.2. Modelo para Análisis Hidráulico y de Socavación

4.2.2.1. Topografía y Estudio de Suelo

El levantamiento topográfico se modela en Civil 3D, mientras que con el sondeo de suelo se procede a realizar análisis granulométrico.

4.2.2.2. Procesos en HEC-RAS para Análisis Hidráulico

En el proyecto HEC-RAS se importa la geometría del cauce y se seleccionan los coeficientes de Manning. Se establece el puente y se calculan las longitudes de expansión y contracción.

Se emplea un flujo uniforme, asignando el valor de caudal calculado en el Análisis Hidrológico. Luego se asignan las condiciones de frontera, seleccionando una

pendiente normal y asignado los valores aguas arriba y aguas abajo calculados para obtener las longitudes de expansión y contracción.

Con los datos para flujo uniforme ingresados en el modelo, se procede a realizar simulación, seleccionando un régimen de flujo mixto para que la simulación nos indique el estado del flujo.

Se obtienen los resultados y se procede a analizar las tablas, secciones transversales y perfiles generados por la simulación.

4.2.2.3. *Procesos en HEC-RAS para Análisis de Socavación*

Con los datos del flujo uniforme ingresados en el modelo y con los resultados de esta simulación, se procede a realizar cálculo de diseño hidráulico. Esta función es la que realiza la modelación de la socavación del puente.

En la pestaña de socavación por contracción se asigna el valor del diámetro medio calculado en el estudio granulométrico del suelo y en la lista ecuaciones se selecciona “dejar por defecto” para que el programa calcule ambas y elija la mayor. En la pestaña de socavación por expansión se selecciona el K1 correspondiente y en la lista ecuación de se selecciona “dejar por defecto” para que el programa calcule ambas y elija la mayor.

Con todos los datos asignados, se realiza modelación. Los resultados son un esquema de la socavación y un reporte que indica la socavación total a ambos lados.

4.3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realiza análisis de los parámetros morfológicos de la cuenca, del resultado de la modelación hidrológica en HEC-HMS, y del resultado de la modelación hidráulica y de socavación en HEC-RAS.

Tomando en cuenta los resultados y los análisis formulados en base a los mismos se elaboran las conclusiones y recomendaciones.

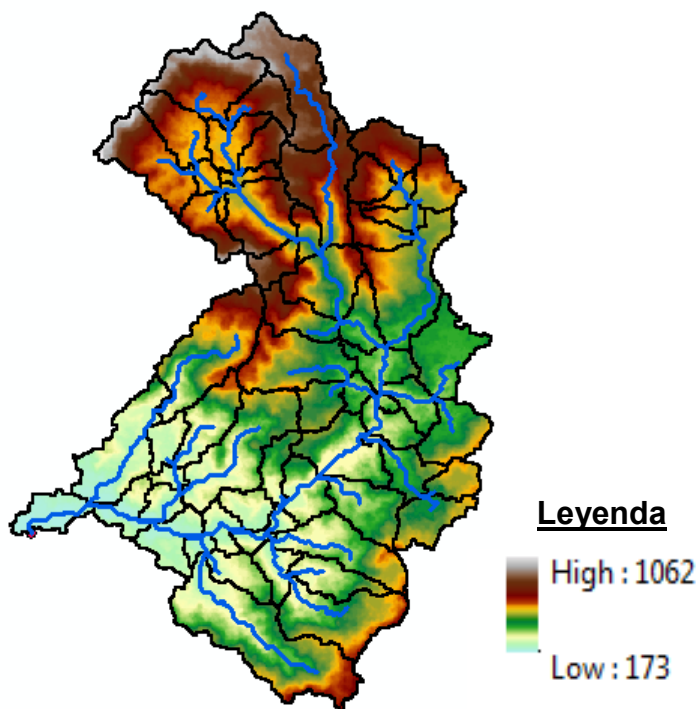
5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1. MORFOLOGÍA DE LA CUENCA

5.1.1. Delimitación de la Cuenca

En ArcGis se delimita la cuenca y sus propiedades.

Figura 26: Modelo de la Cuenca y sus Elevaciones



Tomado de Interface de Usuario proyecto ArcGis elaborado para la Cuenca en Estudio

5.1.2. Parámetros Generales

5.1.2.1. Cálculos

Ancho

$$W = \frac{A}{L} = \frac{121.65}{25.54} = 4.76 \text{ km}$$

Desnivel Altitudinal: $DA = H_{max} - H_{min} = 619 - 153 = 466 \text{ m}$

5.1.2.2. Resumen de los Parámetros Generales

Tabla 16: Parámetros Generales de la Cuenca en Estudio

Perímetro	91.90 km
Superficie Total	121.65 km ²
Longitud de Cauce	25.54 km
Ancho	4.76 km
Altura Máxima	619 m
Altura Mínima	153 m
Desnivel Altitudinal	466 m

Elaborada por Br. Hernández Vega y Br. Rivas Albuquerque

5.1.3. Parámetros de Forma

5.1.3.1. Cálculos

Coeficiente de Gravelius

$$K_g = 0.28 \left(\frac{P}{\sqrt{A}} \right) = 0.28 \left(\frac{91.90}{\sqrt{121.65}} \right) = 2.33$$

Factor de Forma

$$K_f = \frac{A}{L^2} = \frac{121.65}{25.54^2} = 0.19$$

Altura del Rectángulo Equivalente

$$L = \frac{K_g \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_g} \right)^2} \right] = \frac{2.33 \sqrt{121.65}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{2.33} \right)^2} \right] = 43.1 \text{ km}$$

Base del Rectángulo Equivalente

$$l = \frac{K_g \sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_g} \right)^2} \right] = \frac{2.33 \sqrt{121.65}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{2.33} \right)^2} \right] = 2.8 \text{ m}$$

5.1.3.2. Resumen de los Parámetros de Forma

Tabla 17: Parámetros de Forma de la Cuenca en Estudio

Coeficiente de Gravelius	2.33
Factor de Forma	0.22
Altura de Rectángulo Equivalente	43.1 km
Base del Rectángulo Equivalente	2.8 km

Elaborada por Br. Hernández Vega y Br. Rivas Albuquerque

5.1.4. Parámetro de Relieve

5.1.4.1. Cálculos y Resultado

Pendiente Media

$$S_c = \frac{0.466}{25.54} = 0.0182 = 1.82\%$$

5.1.5. Características de la Red de Drenaje

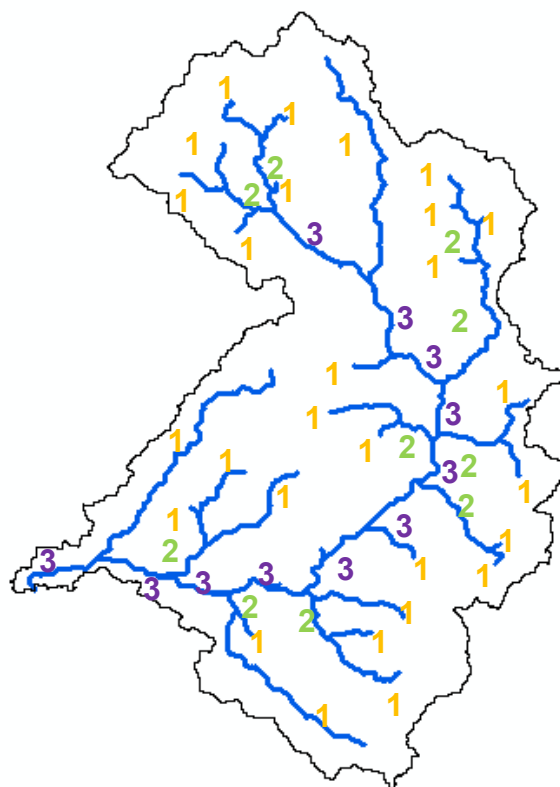
5.1.5.1. Cálculos

Densidad de drenaje

$$D_d = \frac{\sum Lc_i}{A} = \frac{90.39}{121.65} = 0.74 \text{ km/km}^2$$

La Figura 27 muestra la jerarquización de la red fluvial por el Método de Strahler

Figura 27: Jerarquización de la red fluvial



Tomado de Interface de Usuario proyecto ArcGis elaborado para la Cuenca en Estudio y adaptado por Br. Hernández Vega y Br. Rivas Albuquerque

5.1.5.2. Resumen de las Características de la Red de Drenaje

- a) Densidad de Drenaje: 0.74
- b) Orden de Río: 3

5.1.6. Análisis e Interpretación de las Características Morfológicas de la Cuenca.

El Coeficiente de Gravelius de 2.33 indica que la cuenca es rectangular alargada lo que significa que el agua discurre por varios cauces hasta llegar al cauce principal, resultando en una respuesta más lenta. El factor de forma de 0.22 indica que al ser la cuenca alargada y estrecha posee descarga pico más baja que una cuenca

equivalente más ancha. Las medidas del rectángulo equivalente confirman la forma descrita por el coeficiente de Gravelius y el Factor de Forma, y muestra que el centroide se encuentra retirado de la base del mismo.

La densidad de drenaje de 0.74 km/km^2 indica que la cuenca tiene un pobre drenaje, es decir genera poca escorrentía. Su pendiente es de 1.82% la cual no es muy elevada, pero congruente con la localización de la cuenca, a como está descrito en la sección 2.3. Geografía y Clima. La jerarquización nos permite observar lo que indica el Coeficiente de Gravelius, en donde la escorrentía debe transitar por varios cauces de orden 1 hasta llegar al cauce principal que es de orden 3.

La Morfología de la cuenca describe el área en estudio como una cuenca de repuesta lenta. Cabe recordar que la caracterización morfológica permite formar una primera idea de la naturaleza y comportamiento de una cuenca; aunque hay otras características que tienen mayor incidencia sobre la generación de escorrentía.

5.2. ESTUDIO HIDROLÓGICO

5.2.1. Procesamiento de la información.

5.2.1.1. Selección de Estación Meteorológica

Se selecciona la estación meteorológica con código 55027 con coordenadas $12^{\circ}45'48''$ en latitud y $85^{\circ}37'36''$ en longitud ubicada en el municipio de Muy Muy cuyo registro de información de 33 años comprendida entre 1982 al 2014.

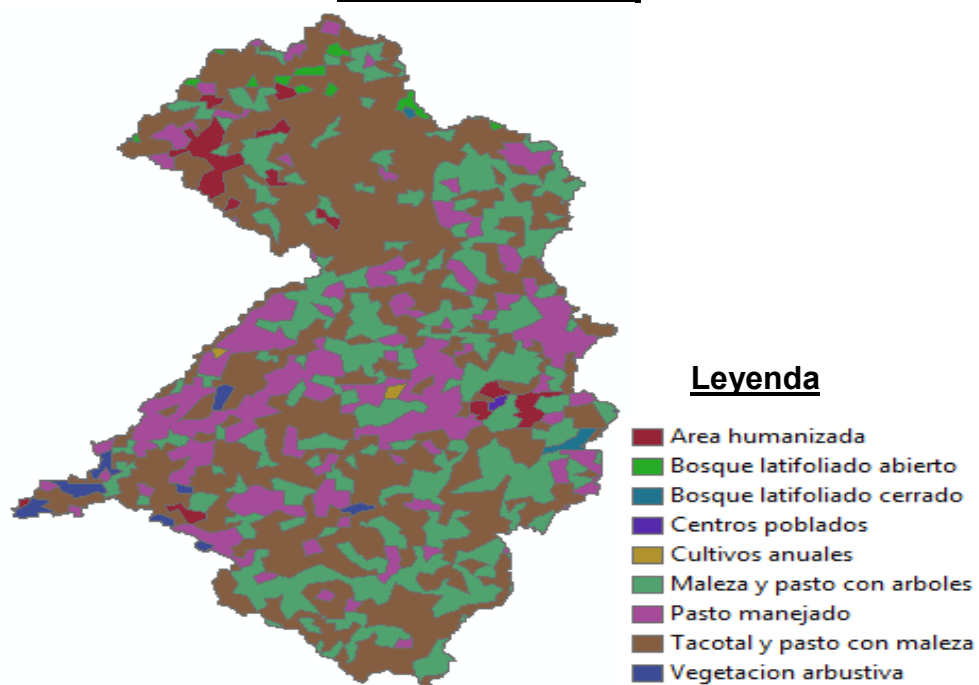
5.2.1.2. Selección del Período de Retorno

El puente Boquito es un puente pequeño ubicado en una carretera cuya clasificación es troncal secundaria, por lo tanto, su período de retorno es de 100 años

5.2.1.3. Obtención de Número de Curva

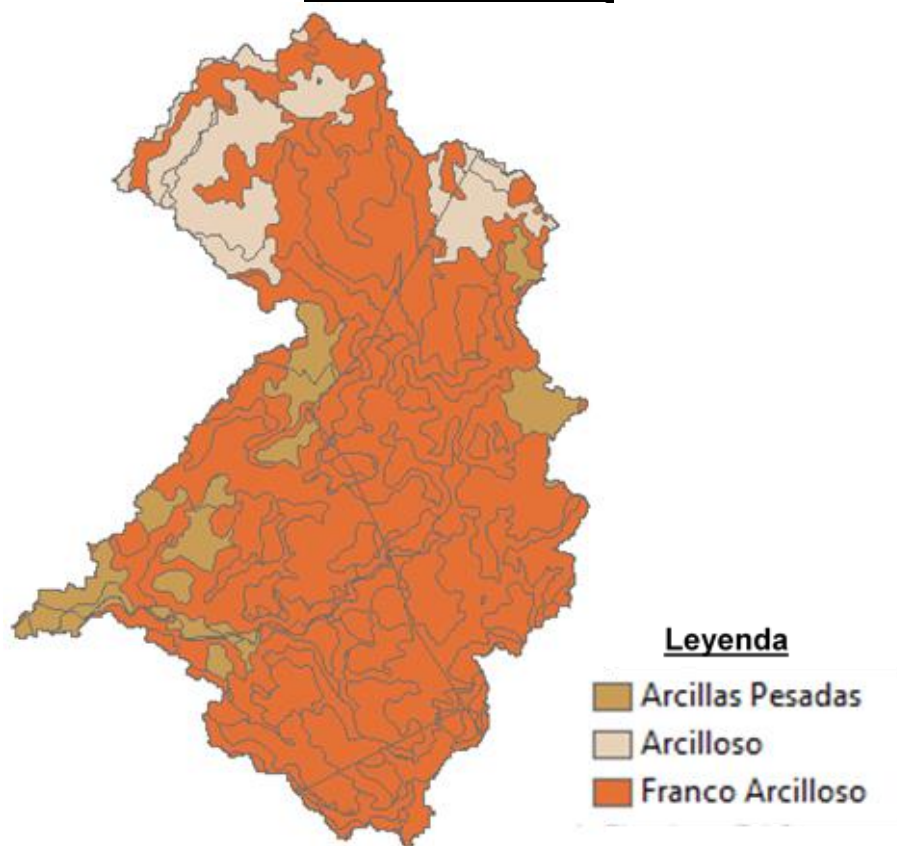
La Figura 28 muestra el Uso de Suelo y la Figura 29 muestra el Tipo de Suelo, utilizando ambos datos se calcula número de curva en cada cuenca a como lo muestra la Figura 30.

Figura 28: Uso de Suelo



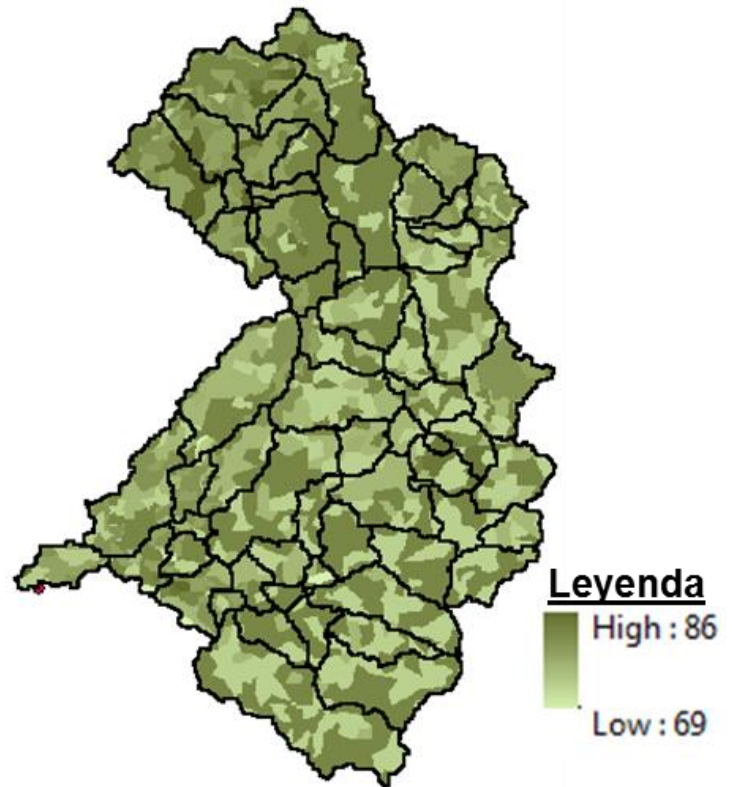
Tomado de Interface de Usuario proyecto ArcGis elaborado para la Cuenca en Estudio

Figura 29: Tipo de Suelo



Tomado de Interface de Usuario proyecto ArcGis elaborado para la Cuenca en Estudio

Figura 30: Número de Curva



Tomado de Interface de Usuario proyecto ArcGis elaborado para la Cuenca en Estudio

5.2.2. Modelación HEC-HMS

5.2.2.1. Modelo de la Cuenca

Del modelo de la cuenca trabajado en ArcGis y exportado a HEC-HMS se obtienen los siguientes valores para cada sub cuenca:

Tabla 18: Características de las Sub Cuenca generadas ArcGis y utilizadas en HEC-HMS

Cuenca	Área Km ²	Lag Time (min)	CN
W1000	1.071	22.436	78.629
W1010	0.429	17.141	78.656
W1020	1.754	17.588	79.8
W1030	2.430	32.474	78.318
W1040	1.097	23.659	74.623
W1050	0.867	19.540	78.898
W1060	1.115	23.944	77.473
W1070	1.898	24.703	77.089
W1080	1.301	25.735	79.031
W1090	0.400	15.357	76.108
W1100	1.482	36.455	76.592
W1110	1.738	28.467	78.405
W1120	0.944	19.223	77.524
W1130	1.151	20.112	76.695
W1140	0.436	12.786	80.137
W1150	0.027	09.644	77.45
W1160	3.349	38.918	77.577
W1170	0.434	16.798	78.028
W1180	1.104	19.720	79.189
W1190	7.875	47.582	77.884
W1200	1.368	26.666	79.617
W1210	1.738	30.259	76.794
W1220	4.142	33.083	77.642
W5580	3.999	43.727	78.215
W5590	5.258	39.602	77.899
W5630	3.988	27.164	80.372
W5640	4.384	41.907	80.126
W630	3.906	22.907	80.693
W640	1.464	23.422	79.781
W650	1.436	26.658	79.573
W660	2.146	25.535	80.47
W670	1.821	20.226	79.196
W680	1.073	16.153	80.066
W690	3.398	21.354	81.049
W700	0.493	16.192	80.599

Tomada de Reporte de Cuenca en Estudio generado por ArcGis.

Tabla 18: Características de las Sub Cuenca generadas ArcGis y utilizadas en HEC-HMS
(Continuación)

Cuenca	Área Km²	Lag Time (min)	CN
W710	0.555	13.225	80.221
W720	1.162	14.161	77.879
W730	0.629	17.989	78.187
W740	0.276	18.184	79.258
W750	1.439	18.056	79.507
W760	1.596	19.436	77.658
W770	0.772	19.608	76.798
W780	2.983	21.063	80.738
W790	4.900	47.420	76.999
W800	1.161	21.832	75.162
W810	0.854	12.071	81.218
W820	1.008	16.445	80.637
W830	2.903	20.831	78.595
W840	1.452	23.934	75.804
W850	1.713	25.071	77.824
W870	1.450	28.210	76.483
W880	2.904	44.340	78.137
W890	3.718	34.296	76.155
W900	1.335	23.513	75.729
W910	0.646	17.362	75.031
W920	0.224	13.705	80.665
W930	1.225	22.457	78.199
W940	2.181	25.317	76.772
W950	1.303	20.943	77.808
W960	2.291	30.203	77.724
W970	4.898	39.932	78.391
W980	2.976	27.324	77.155
W990	1.580	32.930	76.239

Tomada de Reporte de Cuenca en Estudio generado por ArcGis.

Utilizando las áreas de cada cuenca y el número de curva respectivo se calcula el número de curva de toda la cuenca el cual es de 78.308

De la misma forma se obtienen los siguientes valores de los tránsitos que recorren la cuenca.

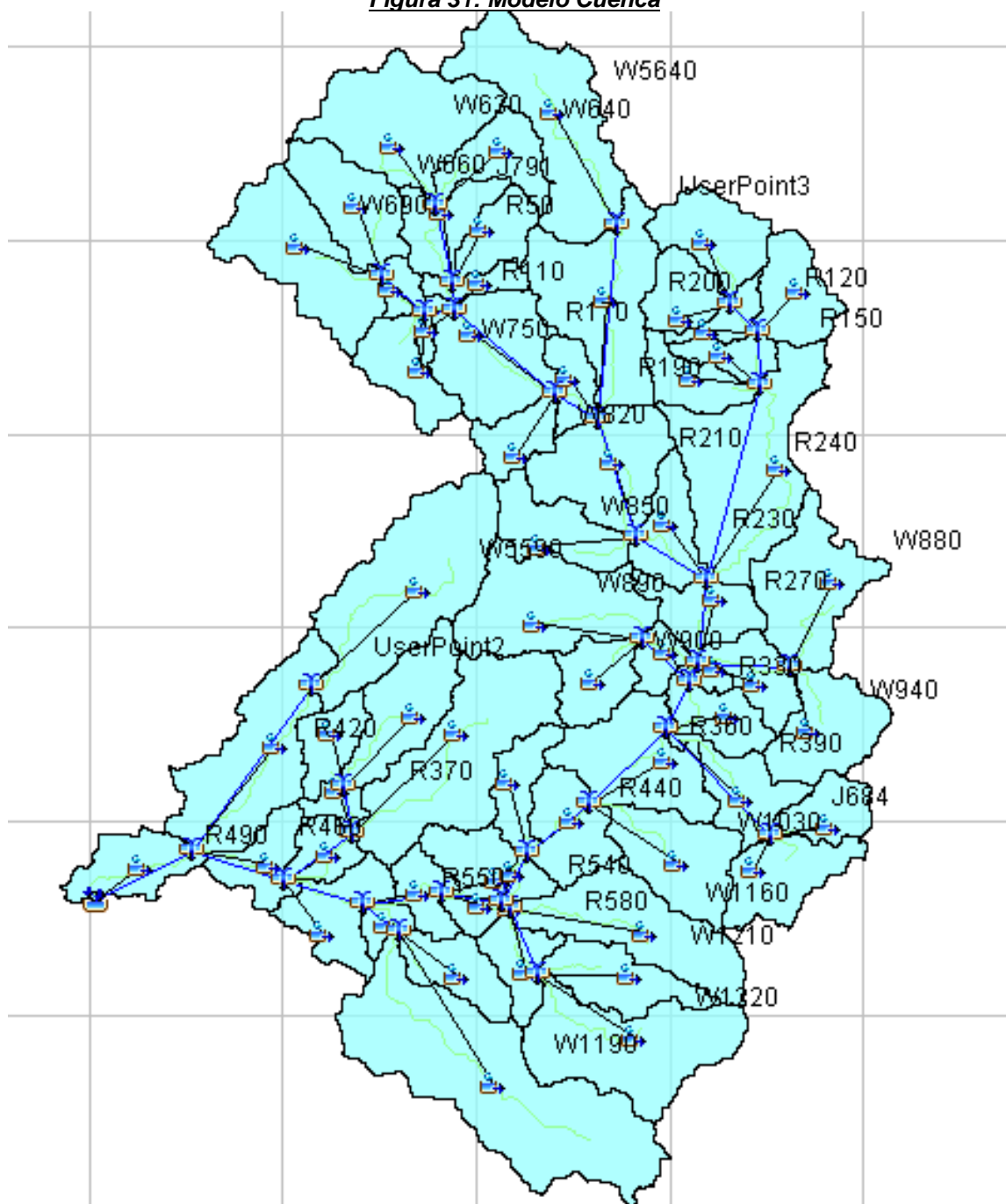
Tabla 19: Datos del Tránsito

Tránsito	Largo	Pendiente
R50	1541.60	0.0259468
R90	551.22	0.0126991
R100	943.11	0.0137842
R110	509.05	0.0373246
R120	690.08	0.0246347
R150	866.88	0.0138428
R170	2176.30	0.0229748
R190	863.88	0.0173635
R210	2247.00	0.0347123
R230	1524.10	0.0164026
R240	4322.40	0.0286877
R270	1442.80	0.0103964
R290	1554.80	0.0090041
R300	1181.70	0.0270805
R310	347.60	0.0258919
R330	1149.70	0.0034791
R360	1826.60	0.0071171
R370	765.07	0.0052283
R390	2596.80	0.0373542
R440	1350.30	0.0251787
R460	1604.20	0.0062334
R470	1514.80	0.0257461
R490	2100.50	0.0166626
R500	1067.50	0.0346604
R510	1423.20	0.0077290
R520	1437.70	0.0097379
R530	1065.40	0.0075090
R540	215.97	0.0046303
R550	874.11	0.0034320
R580	1390.40	0.0194189
R420	3575.80	0.0223788
R200	3528.40	0.0870083

Tomada de Elementos "Reach" en HEC-HMS.

En la Figura 31 se muestra el Modelo de Cuenca en HMS.

Figura 31: Modelo Cuenca



Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-HMS elaborado para la Cuenca en Estudio

La Figura 32 muestra la pestaña de una subcuenca representativa y la Figura 33 muestra la pestaña de un tránsito representativo indicando los métodos utilizados.

Figura 32: Métodos Utilizados en sub cuenca representativa

Subbasin | Loss | Transform | Options

Basin Name: Puentes_Boaquito
 Element Name: W1220
 Description:
 Downstream: 3646
 *Area (KM2): 4.1419
 Latitude Degrees:
 Latitude Minutes:
 Latitude Seconds:
 Longitude Degrees:
 Longitude Minutes:
 Longitude Seconds:
 Canopy Method: --None--
 Surface Method: --None--
 Loss Method: SCS Curve Number
 Transform Method: SCS Unit Hydrograph
 Baseflow Method: --None--

Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-HMS elaborado para la Cuenca en Estudio

Figura 33: Método Utilizado en tránsito representativo

Reach | Routing | Options

Basin Name: Puentes_Boaquito
 Element Name: R50
 Description:
 Downstream: 3782
 Routing Method: Muskingum-Cunge
 Loss/Gain Method: --None--

Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-HMS elaborado para la Cuenca en Estudio

5.2.2.2. Entrada de Datos

Los datos a utilizarse en el componente entrada de datos se calculan de la siguiente manera:

a) Cálculo del Tiempo de Concentración

$$T_c = 0.01026 \frac{25540^{0.77}}{0.0182^{0.385}} = 118.7 \text{ min}$$

$$T_c = 118.7 \text{ min} \div 60 \text{ min/h} = 1.98 \text{ horas}$$

b) Hietograma: Del Anexo A se toma la Tabla 20

Tabla 20: Parámetros de la Ecuaciones de Forma: $I=A/(t+d)^{b20}$

T Años	r	A	d	b
1.5	-0.999	1932.1	14	0.932
2	-0.998	1802.9	13	0.890
5	-0.997	1789.	12	0.830
10	-0.996	1493.0	9	0.767
15	-0.993	2459.7	15	0.842
25	-0.994	2050.4	12	0.792
50	-0.992	2335.0	13	0.795
100	-0.988	3984.0	20	0.871

Tomada de INETER. Informe Curvas de Intensidad de Duración y Frecuencia Estación Meteorológica de Muy Muy. Ver Anexo A página A10

Debido a que el tiempo de concentración es de 1.98 horas, se decide crear hietograma cuya duración sea de 2 horas. Se utilizan los datos de la Tabla 20 al aplicar la Ecuación de Forma para elaborar Hietograma de lluvia utilizando el método del bloque alterno a como se muestra en la Tabla 21. La Figura 24 muestra el hietograma elaborado a partir de la Tabla 21.

En HEC-HMS se crea Componente de Entrada de Datos llamado “Gage 1”. En los datos de serie se especifica que los datos se ingresarán de forma manual con incrementos en milímetros a intervalos de 5 minutos. Se ingresa en la Ventana de Tiempo una duración de lluvia de 2 horas y se utilizan los datos del Hietograma de la Tabla 21 en la pestaña Tabla. El modelo hidrológico ahora cuenta con los datos de lluvia.

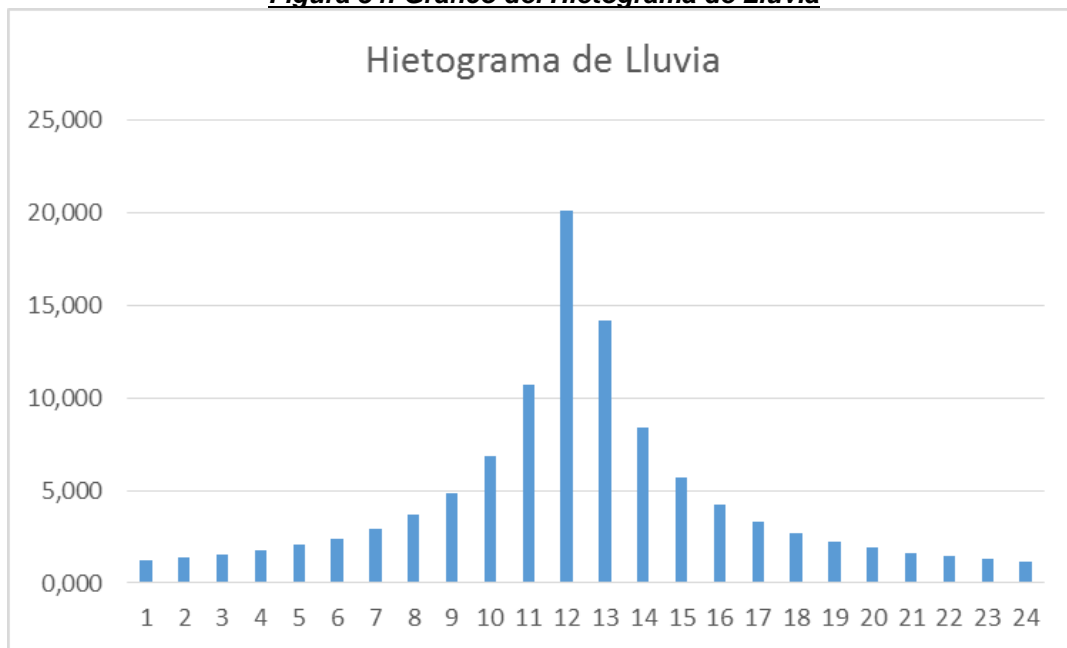
²⁰ Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia de la Precipitación de la Estación Meteorológica de Muy Muy. Octubre 2015

Tabla 21: Cálculo del Hietrograma por el Método del Bloque Alterno

#	Tiempo		MM/H	MM	Δ	Hietograma
1	0	5	241,387	20,116	20,116	1,226
2	5	10	205,943	34,324	14,208	1,367
3	10	15	180,068	45,017	10,693	1,541
4	15	20	160,297	53,432	8,415	1,760
5	20	25	144,668	60,278	6,846	2,043
6	25	30	131,983	65,991	5,713	2,420
7	30	35	121,468	70,857	4,865	2,941
8	35	40	112,603	75,069	4,212	3,696
9	40	45	105,020	78,765	3,696	4,865
10	45	50	98,455	82,046	3,281	6,846
11	50	55	92,713	84,987	2,941	10,693
12	55	60	87,645	87,645	2,658	20,116
13	60	65	83,137	90,065	2,420	14,208
14	65	70	79,100	92,283	2,218	8,415
15	70	75	75,461	94,326	2,043	5,713
16	75	80	72,164	96,218	1,892	4,212
17	80	85	69,161	97,979	1,760	3,281
18	85	90	66,415	99,623	1,644	2,658
19	90	95	63,893	101,164	1,541	2,218
20	95	100	61,568	102,613	1,449	1,892
21	100	105	59,417	103,980	1,367	1,644
22	105	110	57,422	105,273	1,293	1,449
23	110	115	55,565	106,499	1,226	1,293
24	115	120	53,832	107,664	1,165	1,165

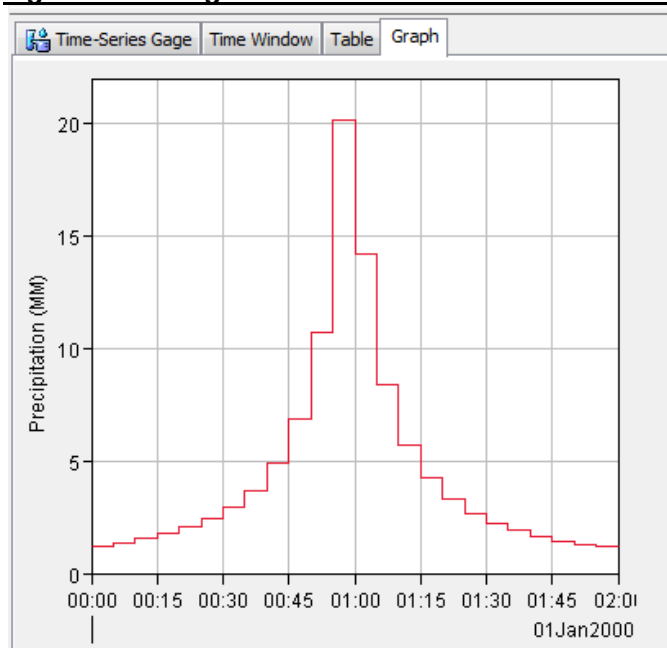
Tomado de archivo Excel "Lluvia Muy Muy" elaborado por Br. Hernández Vega y Br. Rivas Albuquerque

Figura 34: Gráfico del Hietograma de Lluvia



Tomada de Archivo Excel “Lluvia Muy Muy” elaborado por Br. Hernández Vega y Br. Rivas Albuquerque

Figura 35: Hietograma Generado en Entrada de Datos

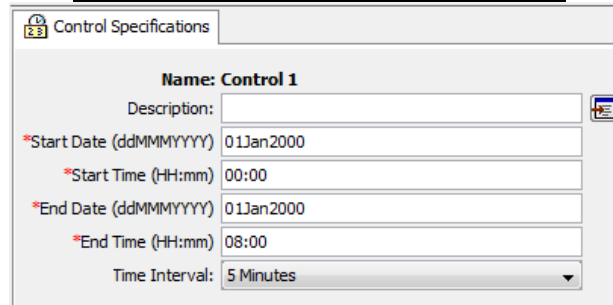


Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-HMS elaborado para la Cuenca en Estudio

5.2.2.3. Modelo de Control

Se establece el modelo de control

Figura 36: Especificaciones de Control



Control Specifications

Name: **Control 1**

Description:

*Start Date (ddMMYYYY): 01Jan2000

*Start Time (HH:mm): 00:00

*End Date (ddMMYYYY): 01Jan2000

*End Time (HH:mm): 08:00

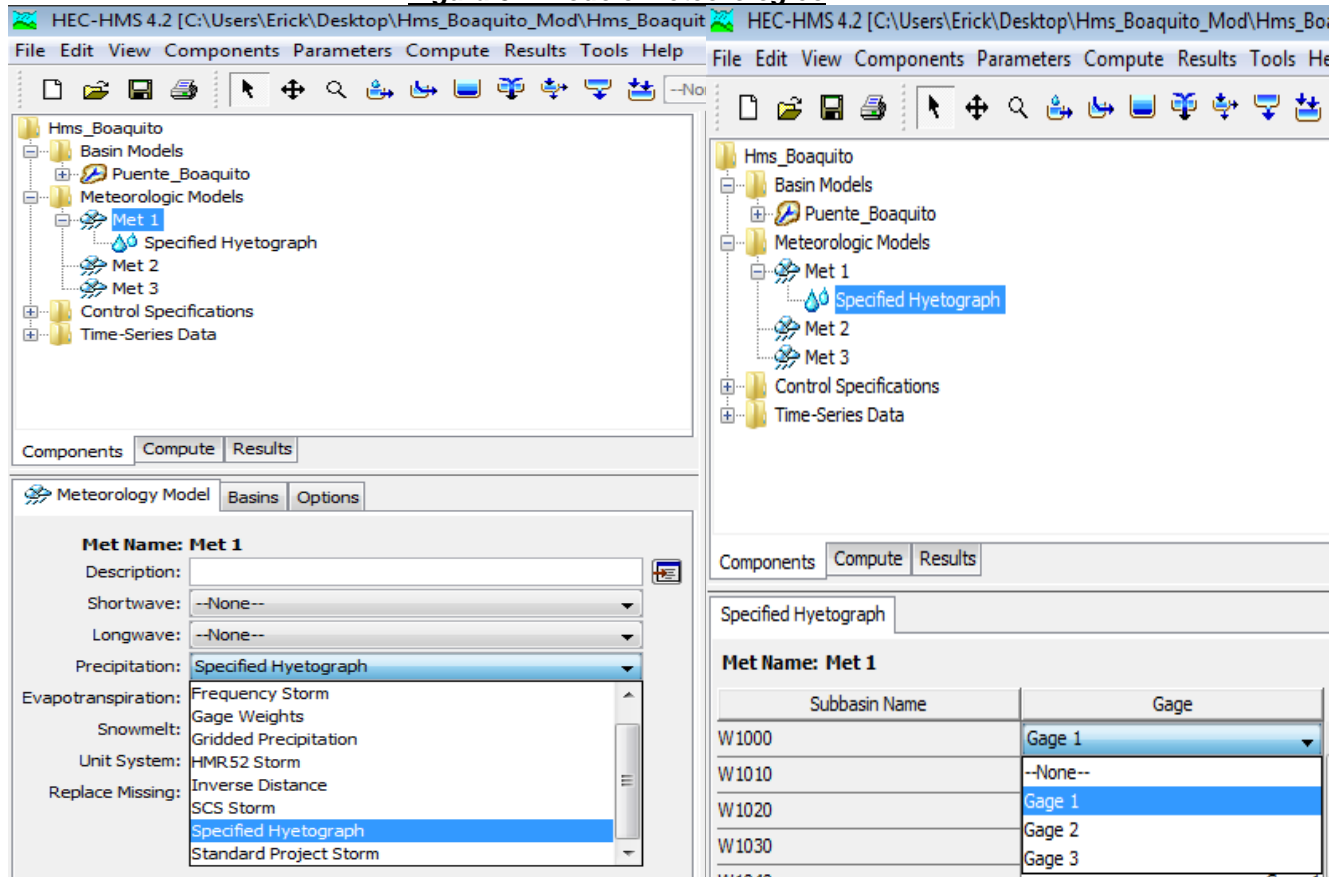
Time Interval: 5 Minutes

Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-HMS elaborado para la Cuenca en Estudio

5.2.2.4. Modelo Meteorológico

Se crea el modelo meteorológico seleccionando en precipitación la opción Hidrograma Especificado y se asigna a cada subcuenca la Serie de Datos a utilizarse a como muestra de manera representativa la Figura 37.

Figura 37: Modelo Meteorológico



HEC-HMS 4.2 [C:\Users\Erick\Desktop\Hms_Boaquito_Mod\Hms_Boaquito]

File Edit View Components Parameters Compute Results Tools Help

Components | **Compute** | **Results**

Meteorology Model | Basins | Options

Met Name: Met 1

Description:

Shortwave: --None--

Longwave: --None--

Precipitation: Specified Hyetograph

Evapotranspiration: Frequency Storm

Snowmelt: Gridded Precipitation

Unit System: HMR52 Storm

Replace Missing: Inverse Distance

SCS Storm

Specified Hyetograph

Standard Project Storm

Specified Hyetograph

Met Name: Met 1

Subbasin Name	Gage
W1000	Gage 1
W1010	--None--
W1020	Gage 1
W1030	Gage 2
	Gage 3

5.2.3. Resultados

En la Tabla 22 se detalla cada elemento hidrológico el área drenada, la descarga pico, el tiempo pico y la precipitación de exceso. El caudal calculado para el punto de cierre es de 1,506.8 m³/s a como lo muestra el reporte de HEC-RAS presentado en la Figura 38. La Figura 39 muestra gráfico del caudal en el punto de cierre.

Tabla 22: Resultado HEC-HMS

Elemento Hidrológico	Área Km²	Descarga Pico m³/s	Tiempo Pico	Precipitación de Exceso mm
W5640	4.3837	55.9	01Jan2000, 01:50	70.7
W5590	5.2578	63.6	01Jan2000, 01:45	65.67
W1220	4.1419	55.8	01Jan2000, 01:40	65.1
W1210	1.7384	23.8	01Jan2000, 01:35	63.24
W1200	1.3685	22.5	01Jan2000, 01:30	69.54
W1190	7.8747	84.6	01Jan2000, 01:55	65.64
W1180	1.1044	21	01Jan2000, 01:25	68.57
W1170	0.43393	8.5	01Jan2000, 01:20	65.96
W1160	3.3487	40.6	01Jan2000, 01:45	64.96
W1150	0.0266758	0.6	01Jan2000, 01:10	64.68
W1140	0.4357	10.5	01Jan2000, 01:15	70.73
W1130	1.1506	19.7	01Jan2000, 01:25	63.02
W1120	0.94432	17	01Jan2000, 01:25	64.84
W1110	1.7384	26.4	01Jan2000, 01:35	66.8
W1100	1.4823	18	01Jan2000, 01:45	62.8
W1090	0.40014	7.6	01Jan2000, 01:20	61.75
W1080	1.3009	21.4	01Jan2000, 01:30	68.21
W1070	1.8975	29.6	01Jan2000, 01:30	63.88
W1060	1.115	18	01Jan2000, 01:30	64.73
W1050	0.86696	16.4	01Jan2000, 01:25	67.91
W1040	1.0973	15.8	01Jan2000, 01:30	58.57
W1030	2.4302	34	01Jan2000, 01:40	66.61
W1020	1.7544	36.1	01Jan2000, 01:20	69.96
W1010	0.42948	8.6	01Jan2000, 01:20	67.36
W1000	1.0706	18.6	01Jan2000, 01:25	67.3
W990	1.5801	20.2	01Jan2000, 01:40	62.03
W980	2.9761	43.8	01Jan2000, 01:35	64.03
W970	4.8977	60.1	01Jan2000, 01:50	66.77

Tabla 22: Resultado HEC-HMS (Continuación)

Elemento Hidrológico	Área Km²	Descarga Pico m³/s	Tiempo Pico	Precipitación de Exceso mm
W960	2.2914	32.6	01Jan2000, 01:35	65.28
W950	1.3027	22.8	01Jan2000, 01:25	65.47
W940	2.1812	33.1	01Jan2000, 01:30	63.19
W930	1.2253	20.9	01Jan2000, 01:25	66.34
W920	0.22408	5.3	01Jan2000, 01:15	71.95
W910	0.64555	11	01Jan2000, 01:20	59.43
W900	1.3347	20.2	01Jan2000, 01:30	60.93
W890	3.7177	46	01Jan2000, 01:40	61.85
W880	2.9041	33	01Jan2000, 01:55	66.2
W870	1.4503	20.5	01Jan2000, 01:35	62.56
W5580	3.9987	46	01Jan2000, 01:50	66.38
W850	1.7126	27.3	01Jan2000, 01:30	65.51
W840	1.4521	21.9	01Jan2000, 01:30	61.09
W830	2.9032	52.7	01Jan2000, 01:25	67.23
W820	1.0083	22.2	01Jan2000, 01:20	71.88
W810	0.85362	21.9	01Jan2000, 01:15	73.23
W800	1.1613	17.8	01Jan2000, 01:25	59.71
W790	4.9003	51	01Jan2000, 01:55	63.69
W780	2.9832	58.4	01Jan2000, 01:25	72.12
W770	0.77182	13.4	01Jan2000, 01:25	63.25
W760	1.5961	28.8	01Jan2000, 01:25	65.14
W750	1.4387	28.9	01Jan2000, 01:20	69.29
W740	0.27565	5.4	01Jan2000, 01:20	68.72
W730	0.62866	12	01Jan2000, 01:20	66.31
W720	1.1622	24.2	01Jan2000, 01:15	65.63
W710	0.55486	13.2	01Jan2000, 01:15	70.92
W700	0.49261	10.9	01Jan2000, 01:20	71.79
W690	3.3976	66.7	01Jan2000, 01:25	72.84
W680	1.0733	23.3	01Jan2000, 01:20	70.57
W670	1.8211	34.3	01Jan2000, 01:25	68.58
W660	2.1456	37.5	01Jan2000, 01:30	71.5
W650	1.436	23.6	01Jan2000, 01:30	69.44
W640	1.4645	26	01Jan2000, 01:30	69.91
W630	3.9062	72.4	01Jan2000, 01:25	72.01
W5630	3.988	66.6	01Jan2000, 01:30	71.27
Outlet1	121.649656	1506.8	01Jan2000, 02:00	66.63
UserPoint2	5.2578	63.6	01Jan2000, 01:45	65.67
UserPoint3	4.3837	55.9	01Jan2000, 01:50	70.7

Tabla 22: Resultado HEC-HMS (Continuación)

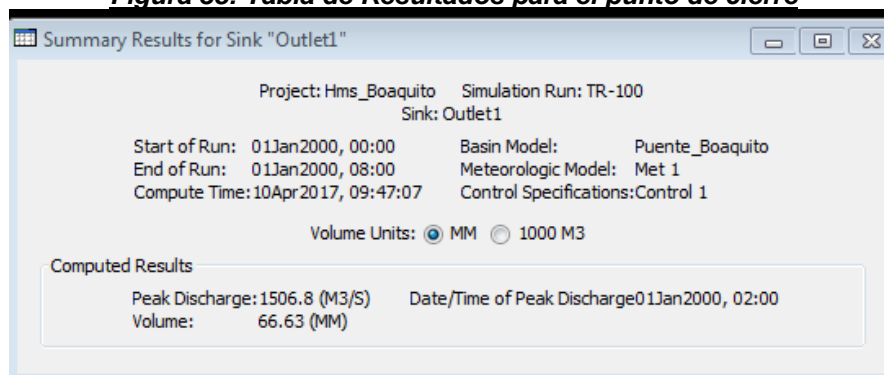
Elemento Hidrológico	Área Km²	Descarga Pico m³/s	Tiempo Pico	Precipitación de Exceso mm
J646	5.8803	79.4	01Jan2000, 01:40	64.55
J651	9.2432	99.3	01Jan2000, 01:50	66.22
J656	10.3334	132.8	01Jan2000, 01:40	65.11
J659	98.3154158	1265.8	01Jan2000, 01:50	66.74
J664	86.1076658	1154.3	01Jan2000, 01:45	66.86
J667	87.6939658	1163.7	01Jan2000, 01:50	66.83
J674	109.609956	1386.2	01Jan2000, 01:55	66.73
J681	120.167356	1504.2	01Jan2000, 01:55	66.68
J684	2.9948	45.5	01Jan2000, 01:30	61.94
J687	75.34745	1029.3	01Jan2000, 01:45	67.1
J694	72.47805	1007.5	01Jan2000, 01:45	67.05
J699	8.68918	111.9	01Jan2000, 01:40	66.47
J702	3.362	49.7	01Jan2000, 01:30	65.93
J705	67.07175	938.1	01Jan2000, 01:40	67.19
J716	5.0853	59.6	01Jan2000, 01:40	64.91
J719	55.27212	805.8	01Jan2000, 01:40	68.28
J722	61.19415	877.1	01Jan2000, 01:40	67.67
J727	5.0524	63.5	01Jan2000, 01:35	61.6
J738	34.01764	536	01Jan2000, 01:35	70.72
J741	47.51122	712.9	01Jan2000, 01:35	68.86
J746	20.17652	359.3	01Jan2000, 01:30	71.43
J749	29.40184	467.1	01Jan2000, 01:35	71.39
J752	7.14118	127.4	01Jan2000, 01:25	65.12
J761	5.20806	96.7	01Jan2000, 01:25	66.61
J764	7.47451	137.3	01Jan2000, 01:25	71.69
J767	16.18502	289.3	01Jan2000, 01:30	71.29
J772	2.9833	57.2	01Jan2000, 01:20	67.43
J779	5.5432	102.8	01Jan2000, 01:25	72.32
J782	7.88	140.4	01Jan2000, 01:30	70.95
J791	5.3707	98.2	01Jan2000, 01:25	71.44
R50	5.3707	98.3	01Jan2000, 01:30	71.43
R90	7.88	139.3	01Jan2000, 01:30	70.98
R100	5.5432	102.2	01Jan2000, 01:30	72.31
R110	7.47451	136.4	01Jan2000, 01:30	71.73
R120	2.9833	56.1	01Jan2000, 01:25	67.46
R150	5.20806	96.2	01Jan2000, 01:25	66.6
R170	16.18502	285.6	01Jan2000, 01:30	71.28
R190	20.17652	354.1	01Jan2000, 01:30	71.46

Tabla 22: Resultado HEC-HMS (Continuación)

Elemento Hidrológico	Área Km ²	Descarga Pico m ³ /s	Tiempo Pico	Precipitación de Exceso mm
R210	29.40184	464.2	01Jan2000, 01:35	71.37
R230	34.01764	528.2	01Jan2000, 01:35	70.72
R240	7.14118	126.1	01Jan2000, 01:35	65.16
R270	47.51122	710.7	01Jan2000, 01:40	68.86
R290	5.0853	59.4	01Jan2000, 01:45	64.94
R300	5.0524	63.5	01Jan2000, 01:40	61.59
R310	55.27212	804.2	01Jan2000, 01:40	68.3
R330	61.19415	861.7	01Jan2000, 01:45	67.62
R360	67.07175	936.6	01Jan2000, 01:45	67.2
R370	3.362	49.6	01Jan2000, 01:35	65.92
R390	2.9948	44.9	01Jan2000, 01:35	61.92
R440	72.47805	997.1	01Jan2000, 01:45	67.07
R460	109.609956	1381.6	01Jan2000, 01:55	66.71
R470	8.68918	111.4	01Jan2000, 01:45	66.46
R490	120.167356	1491.6	01Jan2000, 02:00	66.68
R500	75.34745	1019.4	01Jan2000, 01:50	67.12
R510	98.3154158	1257.2	01Jan2000, 01:55	66.74
R520	87.6939658	1156.2	01Jan2000, 01:50	66.83
R530	86.1076658	1150.2	01Jan2000, 01:50	66.86
R540	10.3334	132.1	01Jan2000, 01:40	65.12
R550	9.2432	99	01Jan2000, 01:55	66.2
R580	5.8803	78.8	01Jan2000, 01:40	64.54
R420	5.2578	63.5	01Jan2000, 01:55	65.76
R200	4.3837	55.7	01Jan2000, 01:55	70.77

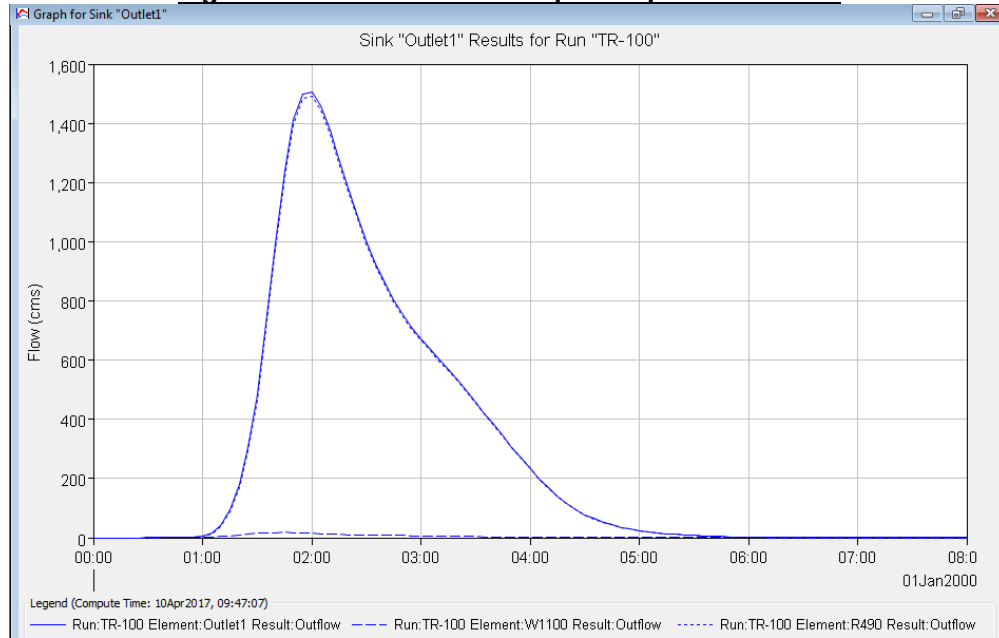
Tomado de "Global Summary Results for TR-1000" proyecto HEC-HMS elaborado para la Cuenca en Estudio. Adaptado a tabla por Br. Hernández Vega y Br. Rivas Albuquerque

Figura 38: Tabla de Resultados para el punto de cierre



Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-HMS elaborado para la Cuenca en Estudio

Figura 39: Gráfica del Caudal para el punto de cierre



Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-HMS elaborado para la Cuenca en Estudio

5.2.4. Análisis e Interpretación del Estudio Hidrológico

El caudal de 1506.8 m³/s calculado en HEC-HMS indica que la cuenca es propensa a generar escorrentía. Aunque los datos morfológicos de la cuenca inicialmente indicaban una cuenca de respuesta lenta, el número de curva muestra una cuenca con un bajo potencial de retención máxima. El modelo hidrológico demuestra que la capacidad de retención de una cuenca es más influyente en la generación de escorrentía que sus características morfológicas.

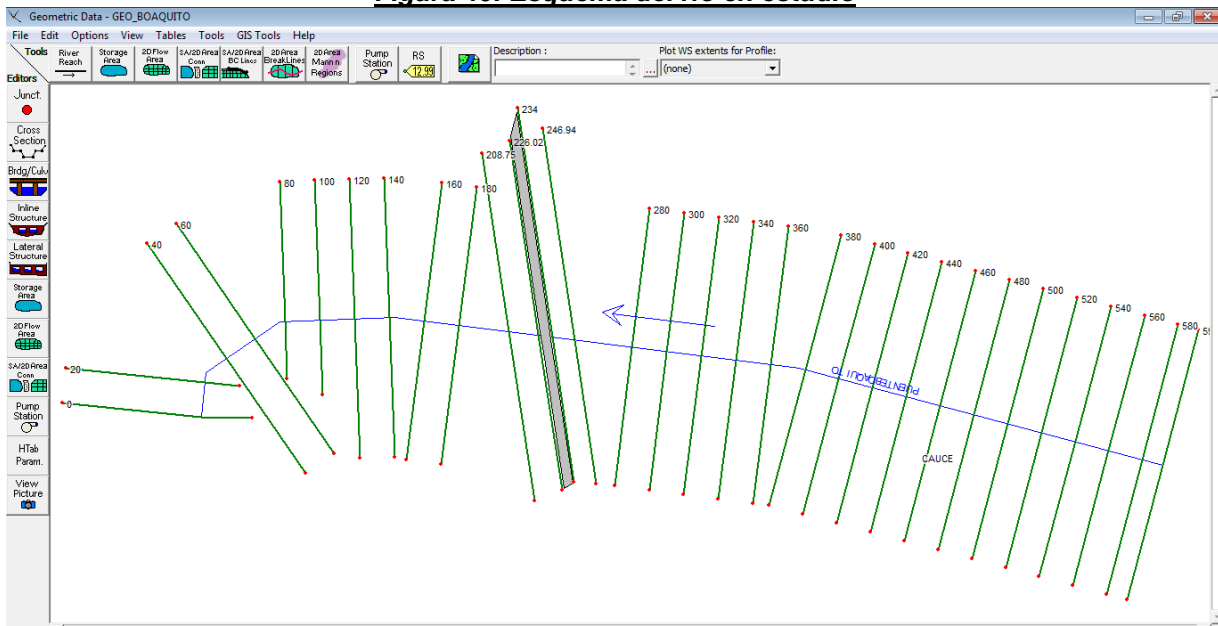
Estos resultados demuestran que el uso y tipo de suelo inciden grandemente en la generación de escorrentía. La cuenca del Río Boaquito, ha sido parte del avance de la frontera agrícola y estos resultados muestran como el ser humano ha incidido en la repuesta hidrológica de la cuenca en estudio.

5.3. ESTUDIO HIDRÁULICO

5.3.1. Datos y Modelación

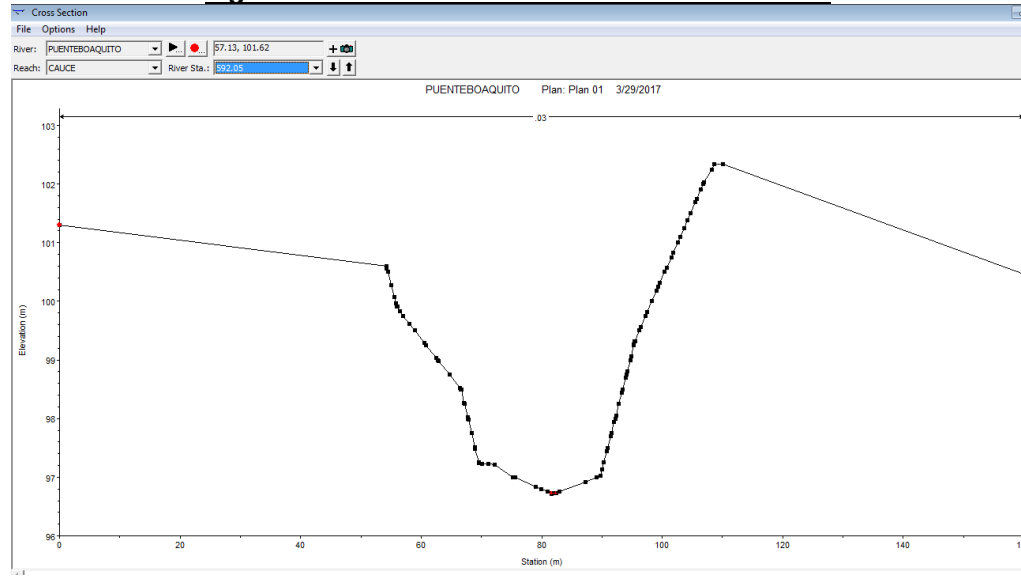
En el Anexo B se presenta modelo elaborado en Civil3D a partir del levantamiento topográfico. Se utilizan los datos geométricos para crear en modelo geométrico en HEC-RAS. La Figura 40 muestra el esquema del río y las Figuras 41 y 42 muestran dos secciones transversales del río.

Figura 40: Esquema del río en estudio



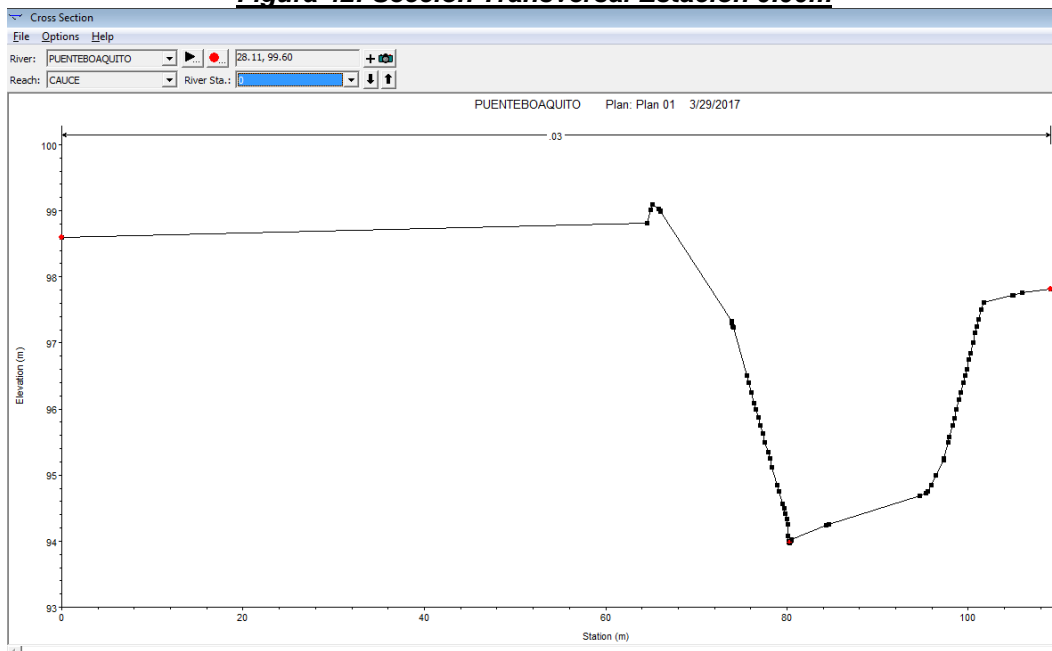
Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puesto en Estudio

Figura 41: Sección Transversal Estación 592.05m



Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

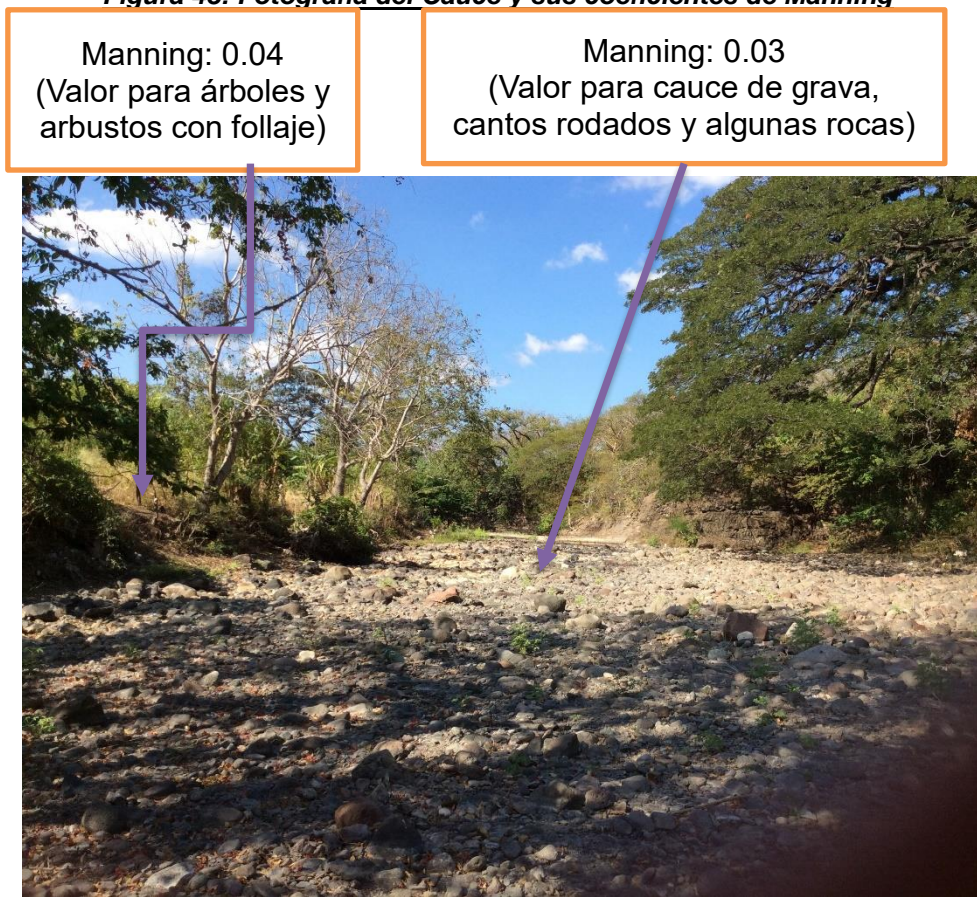
Figura 42: Sección Transversal Estación 0.00m



Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

La Figura 43 evidencia la selección del coeficiente de Manning de 0.04 para la planicie de inundación y del coeficiente de Manning de 0.03 para el canal de inundación.

Figura 43: Fotografía del Cauce y sus coeficientes de Manning



Fotografía tomada y adaptada por Br. Hernández Vega

La Tabla 23 muestra los resultados del cálculo de las estaciones de contracción y expansión. Los cálculos fueron procesados en Excel.

Tabla 23: Cálculo de Estaciones de Contracción y Expansión

Elemento	Dato	Descripción	Conv. Ft.
Ancho de cauce	39		
LE	17.27	longitud de expansión	
RE	2	Razón de expansión	
nob/nc	1.333		
b/B	0.91687763		
nob	0.04	Manning planicie de inundacion	
nc	0.03	Manning canal de inundacion	
b	21.73	ancho de apertura del puente	
B	23.7	ancho total de la zona inundada	
S	45.68	pendiente pie/milla	
So	0.00865217	pendiente fondo cauce m/m	
elv 1	96.34		316.076115
elv 2	94.35		309.547244
dist	230		754.593175
Lobs	8.635	longitud de obstrucción promedio	
long 1	8.63		
long.2	8.64		
LC	12.9525	longitud de contracción	
RC	1.5	razón de contracción	
nob/nc	1.333		
b/B	0.91687763		
nob	0.04	Manning planicie de inundación	
nc	0.03	Manning canal de inundación	
b	21.73	ancho de apertura del puente	
B	23.7	ancho total de la zona inundada	
s	6.56	pendiente pie/milla	
So	0.0012429	pendiente fondo cauce m/m	
elv 1	96.79		317.552493
elv 2	96.34		316.076115
dist	362.052		1187.83464
Lobs	8.635	longitud de obstrucción promedio	
long 1	8.63		
long.2	8.64		
Ancho de puente+2	7.70		
Estación 1	208.75		
Estación 2	226.02		
Puente	230		
Estación 3	234		
Estación 4	246.94		

Tomado de archivo Excel "LE-LC" elaborado por Br. Hernández Vega y Br. Rivas Albuquerque

Se elabora modelo del puente en base a su geometría. La Figura 44 muestra la pestaña en donde se insertan los datos geométricos del puente y la Figura 45 muestra el esquema del puente aguas arriba y aguas abajo.

Figura 44: Datos Geométrico del Puente

Deck/Roadway Data Editor

Distance	Width	Weir Coef
1	5.7	1.4

Clear Del Row Ins Row Copy US to DS

Upstream			Downstream		
Station	high chord	low chord	Station	high chord	low chord
1 0.	103.96	95.347	0.	103.96	95.75
2 111.81	103.96	95.347	104.526	103.96	95.75
3 111.81	103.96	102.96	104.526	103.96	102.96
4 135.51	103.96	102.96	128.226	103.96	102.96
5 135.51	103.96	95.347	128.226	103.96	95.75
6 216.632	103.96	95.347	202.063	103.96	95.75
7					
8					

U.S Embankment SS 1 D.S Embankment SS 1

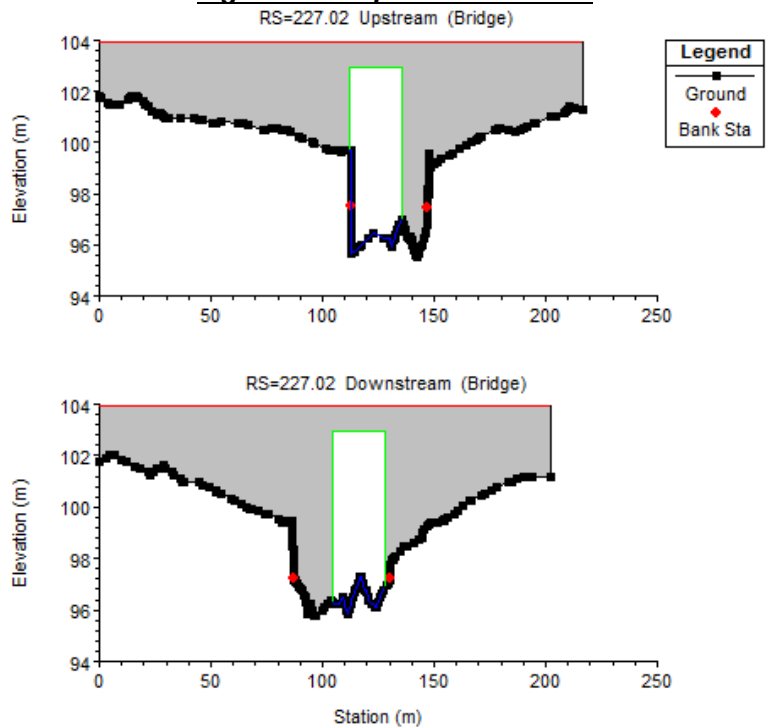
Weir Data
Max Submergence: 0.98 Min Weir Flow El: 103.96

Weir Crest Shape
☒ Broad Crested
☐ Ogee

OK Cancel

Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

Figura 45: Esquema del Puente



Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

5.3.2. Parámetros Hidráulicos

En los datos de flujo uniforme se asigna caudal de 1506.8 m³/s y en las condiciones de frontera se establece una profundidad normal con pendiente de 0.00124m/m aguas arriba y pendiente de 0.00865m/m aguas abajo.

Figura 46: Caudal Ingresado

Flow Change Location			Profile Names and Flow	
River	Reach	RS	TR-100	
1 PUENTEBOAQUITO	CAUCE	592.05	1506.8	

Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

Figura 47: Condición de Frontera

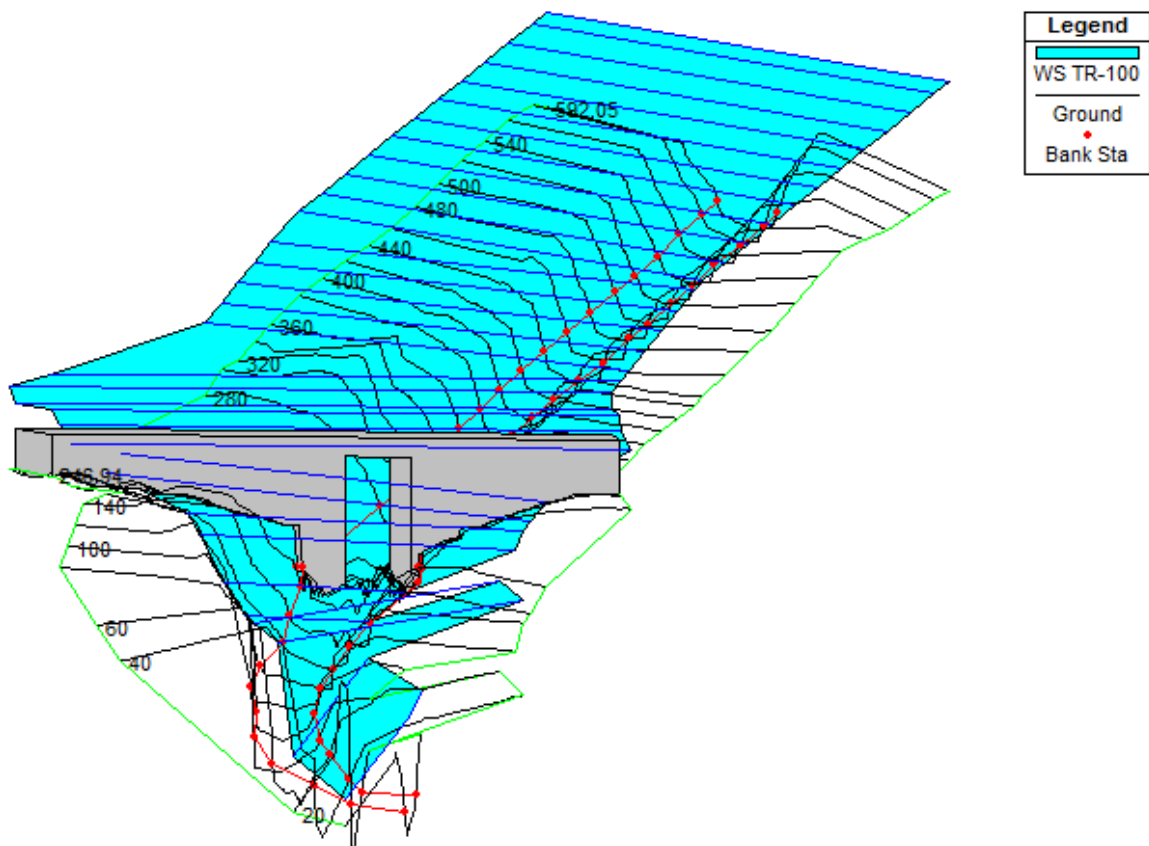
River	Reach	Profile	Upstream	Downstream
PUENTEBOAQUITO	CAUCE	all	Normal Depth S = 0.00124	Normal Depth S = 0.00865

Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

5.3.3. Resultados

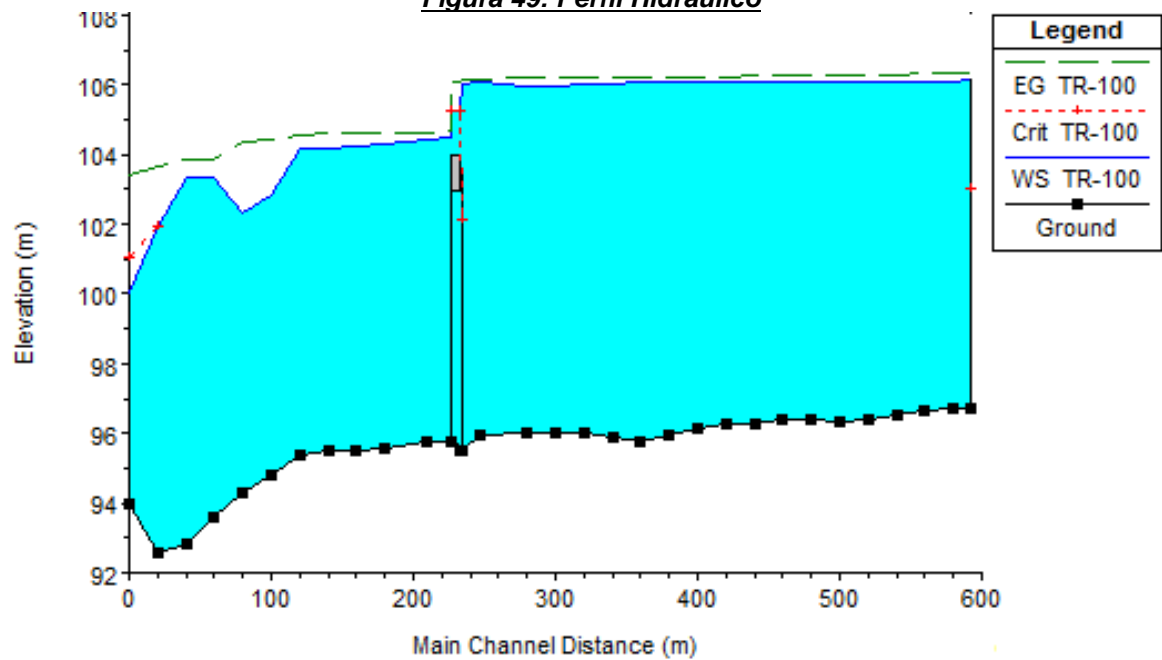
El modelo hidráulico nos muestra que el cauce y el puente no tienen la capacidad hidráulica para el caudal que transcurre. De manera gráfica se observa en la Figuras 48 y 49 que las cotas del nivel del agua para el caudal que transcurre están por encima del nivel de terreno en las secciones transversales y por encima de la altura de tablero y de rasante del puente existente. Las Figuras 50 y 51 muestran las secciones del cauce aguas arriba y aguas abajo respectivamente con el caudal transcurrido. La Figura 52 muestra una sección transversal del cauce con el caudal transcurrido.

Figura 48: Perspectiva Perfil Hidráulico Evaluado para Caudal



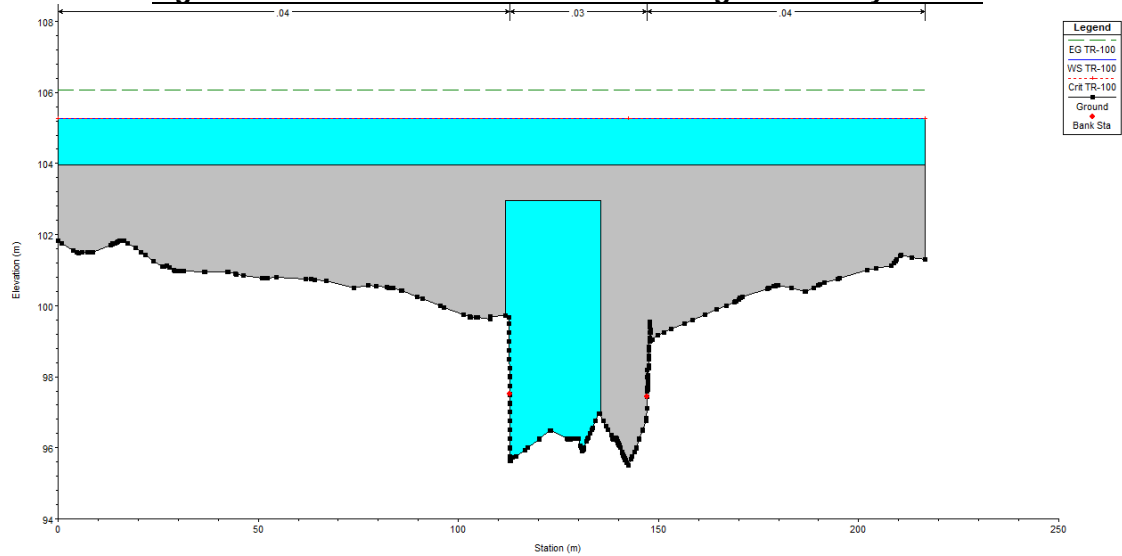
Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

Figura 49: Perfil Hidráulico



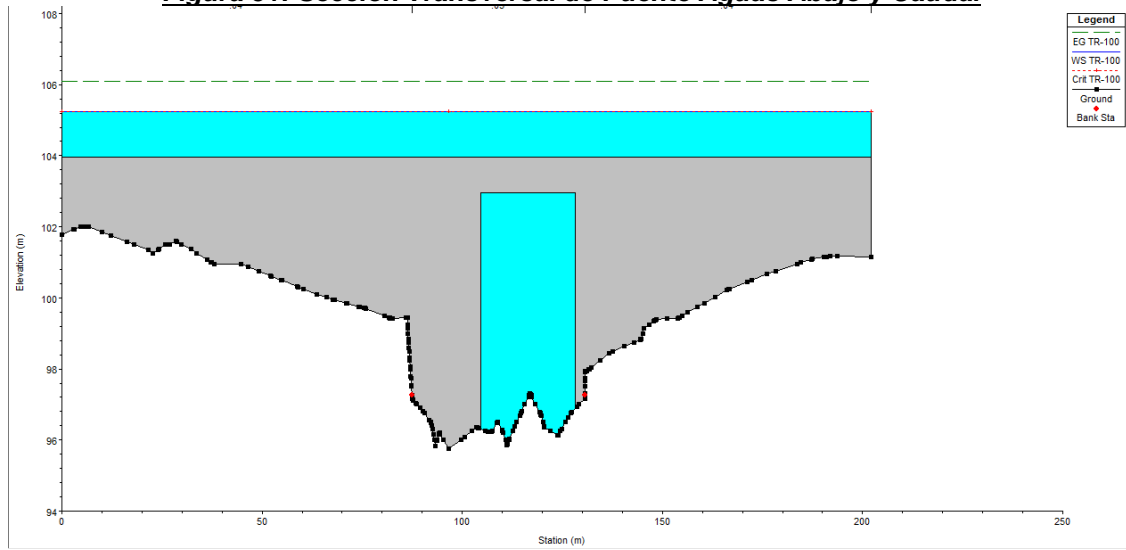
Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

Figura 50: Sección Transversal del Puente Aguas Arriba y Caudal



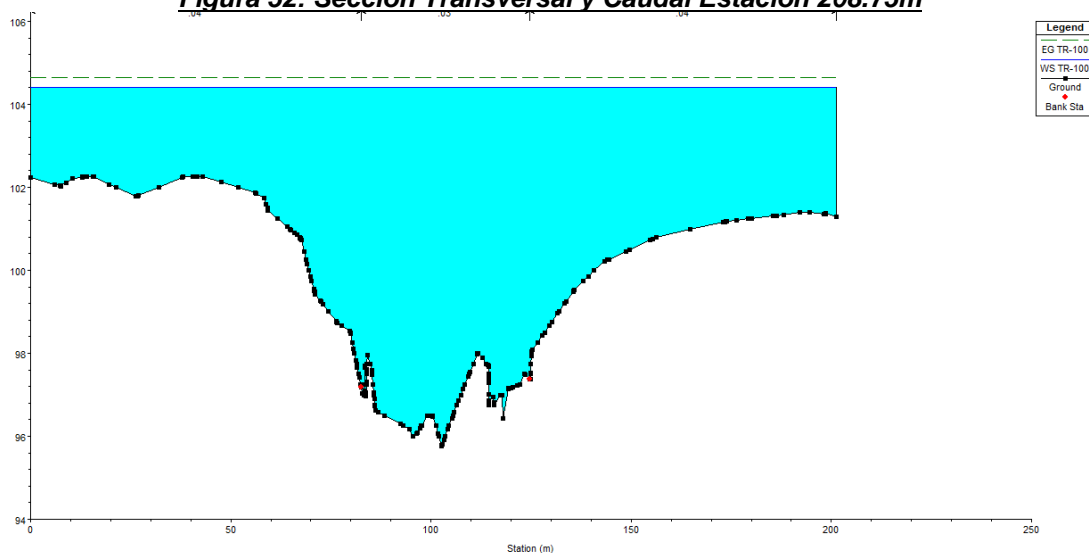
Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

Figura 51: Sección Transversal de Puente Aguas Abajo y Caudal



Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

Figura 52: Sección Transversal y Caudal Estación 208.75m



Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

El comportamiento hidráulico del caudal que transcurre por el cauce en cada sección transversal es descrito por las propiedades hidráulicas que se muestran en las Tablas 24, 25 y 26.

Tabla 24: Resultados en las Secciones Transversales (1 de 3)

Estacionamiento	Caudal (m³/s)	Elevación Mínima en el Canal (m)	Elevación superficie del agua (m)	Elevación crítica de superficie de agua (m)
592.05	1506.8	96.72	106.14	103.03
580	1506.8	96.71	106.11	
560	1506.8	96.64	106.08	
540	1506.8	96.50	106.09	
520	1506.8	96.37	106.08	
500	1506.8	96.36	106.08	
480	1506.8	96.42	106.09	
460	1506.8	96.38	106.10	
440	1506.8	96.28	106.10	
420	1506.8	96.24	106.09	
400	1506.8	96.17	106.09	
380	1506.8	95.98	106.08	
360	1506.8	95.79	106.07	
340	1506.8	95.90	106.04	
320	1506.8	96.02	105.99	
300	1506.8	96.03	105.98	
280	1506.8	96.00	105.98	
246.94	1506.8	95.98	106.06	
234	1506.8	95.50	106.05	102.13
226.02	1506.8	95.75	104.48	
208.75	1506.8	95.76	104.41	
180	1506.8	95.59	104.29	
160	1506.8	95.50	104.26	
140	1506.8	95.49	104.20	
120	1506.8	95.39	104.18	
100	1506.8	94.83	102.86	
80	1506.8	94.31	102.31	
60	1506.8	93.60	103.32	
40	1506.8	92.84	103.33	
20	1506.8	92.58	101.92	101.92
0	1506.8	93.97	100.02	101.07

Tomado de "Profile Output Table – Standard Table 1" Interface de Usuario proyecto HEC-RAS
elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

Tabla 25: Resultados en las Secciones Transversales (2 de 3)

Estacionamiento	Elevación del gradiente de energía (m)	Pendiente del gradiente de energía (m/m)	Velocidad en el canal (m/s)	Área de Flujo (m²)
592.05	106.33	0.000333	2.63	932.74
580	106.32	0.000371	2.78	891.90
560	106.31	0.000389	2.86	873.93
540	106.30	0.000374	2.83	892.09
520	106.29	0.000356	2.78	903.13
500	106.28	0.000342	2.72	918.95
480	106.27	0.000304	2.57	958.83
460	106.26	0.000271	2.43	993.80
440	106.25	0.000263	2.40	1006.21
420	106.25	0.000260	2.39	1013.70
400	106.24	0.000259	2.38	1020.53
380	106.23	0.000267	2.43	1008.13
360	106.23	0.000284	2.50	988.73
340	106.22	0.000312	2.61	949.34
320	106.21	0.000352	2.79	901.13
300	106.20	0.000399	2.90	873.04
280	106.19	0.000367	2.77	898.16
246.94	106.14	0.000147	1.79	1333.89
234	106.14	0.000153	1.79	1329.96
226.02	104.66	0.000311	2.32	991.06
208.75	104.65	0.000489	2.64	860.73
180	104.62	0.000599	3.24	735.40
160	104.61	0.000619	3.40	732.32
140	104.59	0.000669	3.49	651.84
120	104.58	0.000657	3.49	642.06
100	104.44	0.002584	6.40	323.52
80	104.34	0.003040	6.82	268.69
60	103.86	0.000889	4.06	549.02
40	103.83	0.000992	4.23	558.20
20	103.67	0.003627	7.37	343.97
0	103.40	0.008756	9.59	256.11

Tomado de "Profile Output Table – Standard Table 1" Interface de Usuario proyecto HEC-RAS
elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

Tabla 26: Resultados en las Secciones Transversales (3 de 3)

Estacionamiento	Apertura Superior (m)	Numero de Froude en el canal	Pérdida por fricción entre secciones (m)	Pérdidas por expansión y contracción entre secciones (m)
592.05	160.00	0.28	0.00	0.00
580	160.00	0.29	0.01	0.00
560	160.00	0.30	0.01	0.00
540	160.00	0.30	0.01	0.00
520	160.00	0.29	0.01	0.00
500	160.00	0.28	0.01	0.01
480	160.00	0.27	0.01	0.00
460	160.00	0.25	0.01	0.00
440	160.00	0.25	0.01	0.00
420	160.00	0.25	0.01	0.00
400	160.00	0.25	0.01	0.00
380	160.00	0.25	0.01	0.00
360	160.00	0.26	0.01	0.00
340	160.00	0.27	0.01	0.00
320	160.00	0.29	0.01	0.00
300	160.00	0.30	0.01	0.00
280	160.00	0.29	0.01	0.04
246.94	205.87	0.18	0.00	0.00
234	216.63	0.18	0.00	0.07
226.02	202.06	0.26	0.01	0.01
208.75	201.28	0.31	0.02	0.01
180	160.00	0.36	0.01	0.00
160	160.00	0.37	0.01	0.00
140	121.95	0.38	0.01	0.00
120	114.64	0.38	0.02	0.12
100	66.12	0.74	0.06	0.05
80	45.51	0.79	0.03	0.45
60	97.39	0.44	0.02	0.01
40	97.20	0.44	0.03	0.12
20	92.42	0.84	0.11	0.16
0	109.09	1.30		

Tomado de "Profile Output Table – Standard Table 1 y Standard Table 2" Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

El puente no tiene la capacidad hidráulica para evacuar el caudal que transcurre. Los datos de la modelación muestran que el tirante de agua en el puente aguas arriba está a una elevación de 104.94m, y que el tirante de agua en el puente aguas abajo está a una elevación de 104.99., cuando la elevación del tablero es 102.96m. En la modelación el tirante de agua está 1.98 metros por encima de la altura de tablero aguas arriba y 2.03 metros por encima de la altura de tablero Aguas Abajo. El detalle de los resultados en el puente se muestra en las Tablas 27 y 28.

Tabla 27: Resultados en el Puente (1 de 2)

Descripción	Dato
Elevación de Gradiente de Energía, Aguas Arriba (m)	106.14
Elevación de la Superficie del Agua, Aguas Arriba (m)	106.05
Caudal Total (m ³ /s)	1506.80
Flujo que pasa por el puente (m ³ /s)	817.26
Elevación donde inicia remanso (m)	103.96
Elevación en el puente donde inicia la presión del flujo (m)	102.96
Cambio de gradiente de energía a través del puente (m)	1.48
Cambio en superficie del agua a través del puente (m)	1.57
Área total de apertura del puente (m ²)	153.35
Velocidad promedio en la abertura del puente (m/s)	5.33

Tomado de "Bridge Output" Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

Tabla 28: Resultados en el Puente (2 de 2)

Elemento	Interior del Puente Aguas Arriba	Anterior del Puente Aguas Abajo
Elevación de Gradiente de Energía, Aguas Arriba (m)	106.07	106.09
Elevación de la Superficie del Agua, Aguas Arriba (m)	105.25	105.24
Elevación Crítica de Superficie de Agua (m)	105.25	105.24
Profundidad máxima del canal (m)	9.62	9.38
Velocidad Promedio en la sección transversal (m/s)	3.45	3.66
Área total del flujo activo en la sección transversal (m ²)	436.78	412.17
Número de Froude en el Canal	0.41	0.43
Fuerza específica (m ³)	1650.61	1621.95
Profundidad hidráulica para la sección transversal	2.02	2.04
Perímetro mojado de la sección transversal (m)	279.86	265.25
Transporte total en la sección transversal (m ³ /s)	18274.2	17014.8
Ancho total mojado de la sección transversal (m)	216.63	202.06
Pérdidas por fricción entre secciones (m)		0.04
Pérdida de contracción y expansión entre secciones		0.00
Esfuerzo de corte (N/m ²)	104.06	119.51
Potencia total del río (N/m s)	358.97	436.89

Tomado de "Bridge Output" Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

5.3.4. Análisis e Interpretación del Estudio Hidráulico

El modelo generado por RAS simula tirantes de agua que van por encima del suelo existente en el caso de las secciones transversales y por encima de la altura de tablero y superficie de rodamiento del puente. Esto se debe al hecho de que el área ocupada por el caudal era mayor a la provista en las secciones transversales y el programa elevó el tirante de agua de forma vertical. Este modelo y sus resultados muestran que tanto el cauce como el puente no tienen la capacidad hidráulica para el caudal que transcurre.

5.4. ESTUDIO DE SOCAVACIÓN

5.4.1. Datos y Modelación

En el Anexo C se indica un valor de 2.93mm para Diámetro Medio o D50. La Figura 53 evidencia un K1 de 0.82, el cual es el valor asignado a estribos verticales con aletones. Se ingresan estos datos en la Modelación Diseño Hidráulico – Socavación de puente a como lo muestran las Figuras 54 y 55.

Figura 53: Estribo y Obra de Protección (Aletones)



Fotografía tomada por Br. Hernández Vega

Figura 54: Datos para Estudio de Socavación (contracción)

	Contraction	Pier	Abutment
	LOB	Channel	ROB
Y1:	6.18	9.62	5.61
V1:	0.97	1.79	0.91
Y0:	1.33	5.75	1.29
Q2:	358.79	930.11	217.90
W2:	112.82	34.25	69.56
D50:	2.93	2.93	2.93
Equation:	Defau	Defau	Defau

Live Bed Specific Data			
Q1:	609.59	520.00	377.21
W1:	102.00	30.12	73.75
K1:	K1 ...	0.590	

Approach XS River Sta.: 246.94

Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

Figura 55: Datos para Estudio de Socavación (expansión)

	Contraction	Pier	Abutment
	Left		Right
Toe sta at Bridge:	111.81		135.51
Toe sta at App:	100.99		120.56
Length:	100.99		85.31
Y1:	6.33		9.12
K1:	0.82 - Vert. with wing walls		
Skew (deg):	90.00		90.00
K2:	1.00		1.00
Equation:	Default		

Froehlich's Eqn. Specific Data		
L':	96.43	96.47
Ya:	6.18	6.17
Qe:	603.69	577.10
Ae:	623.98	526.24

HIRE Eqn. Specific Data		
V1:	0.98	1.82

Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

5.4.2. Resultados

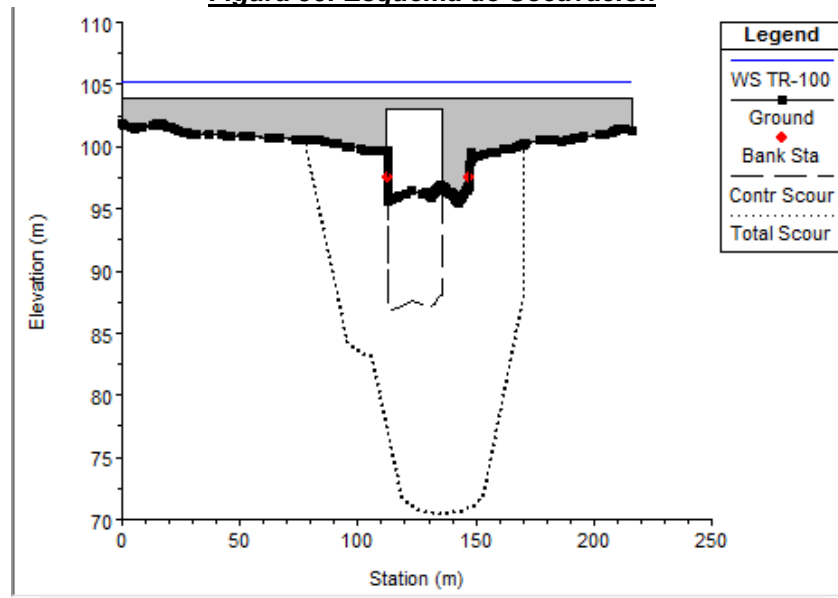
El cálculo de socavación muestra que se utiliza la ecuación de aguas clara para contracción y la ecuación de Froehlich para expansión. El resultado de socavación se muestra en la Tabla 29. La Figura 56 es una representación gráfica de la socavación en el puente y la Figura 57 es el reporte que genera HEC-RAS.

Tabla 29: Socavación en Puente

Tipo de Socavación	Izquierda (m)	Canal (m)	Derecha (m)
Contracción		8.93	
Expansión	16.68		17.51
TOTAL	16.68		26.43

Tomado de "Hydraulic Design Data) Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

Figura 56: Esquema de Socavación



Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

Figura 57: Reporte de Socavación

Contraction Scour		Left	Channel	Right
Input Data				
Average Depth (m):	6.18	9.62	5.61	
Approach Velocity (m/s):	0.97	1.79	0.91	
Br Average Depth (m):	1.33	5.75	1.29	
BR Opening Flow (m3/s):	358.79	930.11	217.90	
BR Top WD (m):	112.82	34.25	69.56	
Grain Size D50 (mm):	2.93	2.93	2.93	
Approach Flow (m3/s):	609.59	520.00	377.21	
Approach Top WD (m):	102.00	30.12	73.75	
K1 Coefficient:		0.590		
Results				
Scour Depth Ys (m):		8.93		
Critical Velocity (m/s):		1.29		
Equation:		Live		
Abutment Scour				
	Left	Right		
Input Data				
Station at Toe (m):	111.81	135.51		
Toe Sta at appr (m):	100.99	120.56		
Abutment Length (m):	100.99	85.31		
Depth at Toe (m):	6.33	9.12		
K1 Shape Coef:	0.82 - Vert.	with wing walls		
Degree of Skew (degrees):	90.00	90.00		
K2 Skew Coef:	1.00	1.00		
Projected Length L' (m):	96.43	96.47		
Avg Depth Obstructed Ya (m):	6.18	6.17		
Flow Obstructed Qe (m3/s):	603.69	577.10		
Area Obstructed Ae (m2):	623.98	526.24		
Results				
Scour Depth Ys (m):	16.68	17.51		
Qe/Ae = Ve:	0.97	1.10		
Froude #:	0.12	0.14		
Equation:	Froehlich	Froehlich		
Combined Scour Depths				
Left abutment scour + contraction scour (m):	16.68			
Right abutment scour + contraction scour (m):	26.43			

Tomado de Interface de Usuario proyecto HEC-RAS elaborado para el Cauce y Puente en Estudio

El puente sufre de una socavación total de 16.69m en el estribo izquierdo y una socavación total del 26.43m en el estribo derecho.

5.4.3. Análisis e Interpretación del Estudio de Socavación

El estudio evidencia que el Puente Boaquito es susceptible a la socavación. El resultado del estudio de socavación es congruente con lo observado en la visita de campo, en donde se constató la destrucción de la obra de protección al pie de uno de sus estribos. Esto es significativo tomando en cuenta que desde la reconstrucción del puente Boaquito, el país ha sufrido sequías.

Figura 58: Fotografía de obras de protección en el puente



Fotografía tomada y adaptada por Br. Hernández Vega

Figura 59: Fotografía de detalle de obra de protección destruida por socavación



Fotografía tomada por Br. Rivas Albuquerque

CONCLUSIONES

Los resultados de la evaluación hidrotécnica del puente existente demuestra la carencia de un Estudio Hidrológico – Hidráulico para la construcción del puente ya que de haberse realizado la longitud de claro libre hubiera sido mayor a la existente y habría presencia de obras de mitigación para proteger las riveras del cauce y la estructura del puente.

El puente existente no tiene la capacidad hidráulica para que el caudal calculado para un período de retorno de 100 años transite sin afectar el puente. En el Anexo D se presentan el caudal, perfil hidráulico y esquema de socavación para un período de retorno de 25 y 50 años. En ambos períodos de retornos el puente no tiene capacidad hidráulica para los caudales que transitan y sufrirá socavación. Esta evaluación demuestra que la sección transversal de Puente Boaquito es demasiado pequeña para el tamaño de la cuenca y el caudal que la misma genera al tener poca capacidad de retención de la precipitación.

En base a la visita de campo y a los resultados del modelo hidráulico, se infiere que la ubicación de los estribos se hizo en base al puente anterior que fue destruido durante el Huracán Felix, utilizando como referencia el fondo del cauce y no el ancho de su sección transversal.

El MTI decidió reutilizar estructuras metálicas de otros puentes dañados durante el Huracán Félix con el propósito de ahorrar costos en la construcción del puente Boaquito y así poder beneficiar con los mismos recursos a más comunidades. Lamentablemente este supuesto ahorro se ve perjudicado al no realizar estudios Hidrotécnicos. La obra de cruce existente no tiene la capacidad hidráulica de escurrir el caudal de diseño para un período de retorno de 25, 50 y 100 años. Un puente debe ser una obra duradera, pero por ahorrar a corto plazo se gastará más a largo plazo ya que el puente sufrirá daños y no cumplirá con su vida útil proyectada.

RECOMENDACIONES

1. Retomar los resultados de esta evaluación hidrotécnica para proponer y evaluar una sección hidráulica eficiente.
2. Construir obras de mitigación que protejan la rivera del cauce y la estructura del puente.
3. Realizar Estudio de Manejo Integral de la Cuenca Río Boaquito.

BIBLIOGRAFÍA

Aparicio Mijares, Francisco. *Fundamentos de la Hidrología de superficie*. Grupo Noriega Editores, 1992

Biblioteca Virtual ENACAL. *Caracterización Municipal de Santa Lucía*.
http://biblioteca.enacal.com.ni/bibliotec/Libros/enacal/Caracterizaciones/Boaco/Santa_Lucia.pdf

Casco Arévalo, Rufo Holvin. *Manual ArcGis 9.3, HEC-GeoHMS, HEC-HMS 3.5*.

CATIE. *Informe Línea Base Sub Cuenca del Río Malacatoya*. Managua, Nicaragua. 2008

COMITRAN. *Manual de Consideraciones Técnicas Hidrológicas e Hidráulicas para la Infraestructura Vial en Centroamérica*. SIECA. 2016

Corporación Suna Hisca. *Hidrología. Tomo I: Componente Biofísico*

Chow, Ven Te; Maidment, David R; Mays, Larry W. *Hidrología Aplicada*. McGraw Hill. 1994

ESRI. *Arc Hydro Tools – Tutorials*. New York. 2011.
<http://downloads.esri.com/archydro/archydro/tutorial/doc/arc%20hydro%20tools%200%20-%20tutorial.pdf>

Lanzas, Mejía, Nestor Javier. *Powerpoints curso de Hidrología Vial*. Universidad Nacional de Ingenierías.

Merwade, Vankatesh. *Terrain Processing and HMS-Model Development using GeoHMs*. Purdue University. 2012.
<https://web.ics.purdue.edu/~vmerwade/education/geohms.pdf>

Ministerio de Transporte e Infraestructura. *Guía Hidráulica para el diseño de estructuras de drenaje en caminos rurales*. Septiembre 2011

Ministerio de Transporte e Infraestructura. *Manual para la revisión de Estudios Hidrotécnicos de drenaje mayor*. Octubre 2008

Ministerio de Transporte y Comunicaciones. *Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje*. Perú, 2012

Moreno Ayestas, Sandra. *Apuntes de Hidrología de Superficie*. Universidad Nacional de Ingenierías.

Olivares, Jordi. *Como obtener hietogramas a partir de Curvas IDF*.
<http://www.hidrojing.com/como-obtener-hietogramas-a-partir-de-curvas-idf-para-hec-hms-y-swmm/>

Sánchez San Ramón, F Javier. *Tránsito de Hidrogramas*. Universidad de Salamanca. Julio 2013. http://hidrologia.usal.es/temas/Transito_Hidrogramas.pdf

Universidad Politécnica de Valencia. *Morfología de la Cuencas hidrográficas*.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10782/Morfolog%C3%ADa%20de%20una%20cuenca.pdf>

US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. *HEC-RAS River Analysis System User's Manual*. Davis, California. 2010.

http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Users_Manual.pdf

US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Quick Start Guide version 3.5*. August 2010.
http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_QuickStart_Guide_3.5.pdf

US Department of Transportation, Federal Highway Administration. *Evaluating Scour at Bridges*. April 2012
<http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/hif12003.pdf>

ANEXO A:

Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia de la Precipitación de la Estación Meteorológica de Muy Muy

INTENSIDADES MAXIMAS ANUALES DE PRECIPITACIÓN
ESTACION: MUY MUY

AÑOS	Duración en minutos						
	5	10	15	30	60	120	360
1982	116.4	95.4	77.6	64.2	38.0	20.3	7.8
1983	162.0	139.8	116.8	112.6	71.9	37.0	28.2
1984	229.0	147.6	110.0	67.4	45.3	29.4	13.0
1985	171.6	142.2	97.2	76.0	40.2	21.1	7.2
1986	187.2	95.4	64.0	36.2	24.7	12.6	6.0
1987	164.4	105.0	80.4	58.6	31.2	16.1	7.5
1988	180.0	151.8	115.6	96.2	74.4	40.3	15.3
1989	162.0	116.4	104.0	71.8	48.9	32.0	12.0
1990	129.6	117.6	80.0	80.0	54.5	28.0	10.6
1991	116.4	76.2	56.8	35.4	19.7	12.8	6.0
1992	150.0	88.2	62.8	38.8	21.8	11.8	5.3
1993	139.2	100.8	95.2	69.2	40.1	24.0	13.1
1994	204.0	106.8	71.2	67.0	46.8	29.3	10.4
1995	204.0	114.0	102.8	94.2	58.6	44.0	20.0
1996	154.8	89.4	67.6	43.6	26.0	16.0	6.6
1997	118.8	81.0	78.4	58.0	45.3	24.3	9.0
1998	117.6	78.0	69.2	44.0	29.7	22.8	9.0
1999	182.4	123.0	85.6	64.0	42.5	23.7	9.9
2000	120.0	120.0	88.0	48.6	37.9	22.9	8.7
2001	104.4	82.8	61.6	43.0	27.1	15.8	6.3
2002	141.6	114.6	111.6	71.4	39.2	21.4	12.0
2003	117.6	100.8	86.0	53.4	44.3	24.7	9.8
2004	120.0	120.0	80.0	49.2	31.0	17.4	7.3
2005	108.0	90.6	79.6	46.6	32.4	23.9	9.5
2006	108.0	96.0	72.0	38.8	24.7	15.3	6.6
2007	162.0	118.8	118.8	113.0	63.4	32.1	12.0
2008	120.0	111.0	74.8	56.6	38.4	22.3	7.6
2009	224.4	116.4	105.6	85.8	44.1	23.4	8.6
2010	228.0	154.8	121.6	68.8	55.0	30.4	14.1
2011	168.0	120.0	118.0	97.0	75.3	39.3	13.5
2012	288.0	175.2	136.8	85.0	53.0	28.3	10.9
2013	270.0	147.0	100.4	55.4	47.0	24.7	8.5
2014	108.0	96.0	82.8	48.4	27.0	16.7	6.4



INTENSIDADES MAXIMAS ANUALES ORDENADAS DURACION EN MINUTOS							
m	5	10	15	30	60	120	360
1	104.4	76.2	56.8	35.4	19.7	11.8	5.3
2	108.0	78.0	61.6	36.2	21.8	12.6	6.0
3	108.0	81.0	62.8	38.8	24.7	12.8	6.0
4	108.0	82.8	64.0	38.8	24.7	15.3	6.3
5	116.4	88.2	67.6	43.0	26.0	15.8	6.4
6	116.4	89.4	69.2	43.6	27.0	16.0	6.6
7	117.6	90.6	71.2	44.0	27.1	16.1	6.6
8	117.6	95.4	72.0	46.6	29.7	16.7	7.2
9	118.8	95.4	74.8	48.4	31.0	17.4	7.3
10	120.0	96.0	77.6	48.6	31.2	20.3	7.5
11	120.0	96.0	78.4	49.2	32.4	21.1	7.6
12	120.0	100.8	79.6	53.4	37.9	21.4	7.8
13	129.6	100.8	80.0	55.4	38.0	22.3	8.5
14	139.2	105.0	80.0	56.6	38.4	22.8	8.6
15	141.6	106.8	80.4	58.0	39.2	22.9	8.7
16	150.0	111.0	82.8	58.6	40.1	23.4	9.0
17	154.8	114.0	85.6	64.0	40.2	23.7	9.0
18	162.0	114.6	86.0	64.2	42.5	23.9	9.5
19	162.0	116.4	88.0	67.0	44.1	24.0	9.8
20	162.0	116.4	95.2	67.4	44.3	24.3	9.9
21	164.4	117.6	97.2	68.8	45.3	24.7	10.4
22	168.0	118.8	100.4	69.2	45.3	24.7	10.6
23	171.6	120.0	102.8	71.4	46.8	28.0	10.9
24	180.0	120.0	104.0	71.8	47.0	28.3	12.0
25	182.4	120.0	105.6	76.0	48.9	29.3	12.0
26	187.2	123.0	110.0	80.0	53.0	29.4	12.0
27	204.0	139.8	111.6	85.0	54.5	30.4	13.0
28	204.0	142.2	115.6	85.8	55.0	32.0	13.1
29	224.4	147.0	116.8	94.2	58.6	32.1	13.5
30	228.0	147.6	118.0	96.2	63.4	37.0	14.1
31	229.0	151.8	118.8	97.0	71.9	39.3	15.3
32	270.0	154.8	121.6	112.6	74.4	40.3	20.0
33	288.0	175.2	136.8	113.0	75.3	44.0	28.2



67

Y: MEDIA, DESV. ESTANDAR, ALFA Y BETA PARA DIFERENTES DURACIONES							
	5	10	15	30	60	120	360
Y MEDIA	159.9	113.1	90.1	64.8	42.4	24.4	10.3
STD.	47.6	24.1	20.4	21.1	14.7	8.0	4.5
ALFA	0.027	0.053	0.063	0.061	0.087	0.159	0.286
BETA	138.486	102.250	80.877	55.281	35.795	20.744	8.245

DESV. MAXIMA A PARTIR DE LA DISTRIBUCION TEORICA Y EMPIRICA

DURACION 5 MINUTOS

I	P(x)	F(x)	Desviaciones
104.4	0.02941	0.08176	0.05235
108.0	0.05882	0.10305	0.04422
108.0	0.08824	0.10305	0.01481
108.0	0.11765	0.10305	0.01460
116.4	0.14706	0.16324	0.01618
116.4	0.17647	0.16324	0.01323
117.6	0.20588	0.17293	0.03296
117.6	0.23529	0.17293	0.06237
118.8	0.26471	0.18285	0.08186
120.0	0.29412	0.19300	0.10112
120.0	0.32353	0.19300	0.13053
120.0	0.35294	0.19300	0.15994
129.6	0.38235	0.28074	0.10161
139.2	0.41176	0.37496	0.03681
141.6	0.44118	0.39870	0.04248
150.0	0.47059	0.48027	0.00968
154.8	0.50000	0.52494	0.02494
162.0	0.52941	0.58808	0.05867
162.0	0.55882	0.58808	0.02926
162.0	0.58824	0.58808	0.00016
164.4	0.61765	0.60795	0.00970
168.0	0.64706	0.63655	0.01051
171.6	0.67647	0.66368	0.01279
180.0	0.70588	0.72111	0.01523
182.4	0.73529	0.73602	0.00072
187.2	0.76471	0.76388	0.00082
204.0	0.79412	0.84254	0.04843
204.0	0.82353	0.84254	0.01901
224.4	0.85294	0.90582	0.05288
228.0	0.88235	0.91414	0.03178
229.0	0.91176	0.91632	0.00455
270.0	0.94118	0.97144	0.03027
288.0	0.97059	0.98231	0.01173
DESV. MAXIMA			0.160



DURACION 10 MINUTOS			
I	P(x)	F(x)	Desviaciones
76.2	0.02941	0.01843	0.01098
78.0	0.05882	0.02653	0.03229
81.0	0.08824	0.04530	0.04293
82.8	0.11765	0.06008	0.05757
88.2	0.14706	0.12119	0.02587
89.4	0.17647	0.13807	0.03840
90.6	0.20588	0.15604	0.04984
95.4	0.23529	0.23710	0.00180
95.4	0.26471	0.23710	0.02761
96.0	0.29412	0.24806	0.04606
96.0	0.32353	0.24806	0.07547
100.8	0.35294	0.33955	0.01339
100.8	0.38235	0.33955	0.04281
105.0	0.41176	0.42147	0.00970
106.8	0.44118	0.45604	0.01486
111.0	0.47059	0.53362	0.06303
114.0	0.50000	0.58538	0.08538
114.6	0.52941	0.59531	0.06589
116.4	0.55882	0.62416	0.06534
116.4	0.58824	0.62416	0.03592
117.6	0.61765	0.64261	0.02496
118.8	0.64706	0.66041	0.01335
120.0	0.67647	0.67756	0.00109
120.0	0.70588	0.67756	0.02832
120.0	0.73529	0.67756	0.05773
123.0	0.76471	0.71757	0.04713
139.8	0.79412	0.87295	0.07883
142.2	0.82353	0.88728	0.06375
147.0	0.85294	0.91150	0.05856
147.6	0.88235	0.91415	0.03180
151.8	0.91176	0.93072	0.01895
154.8	0.94118	0.94062	0.00055
175.2	0.970588	0.97952	0.00893
DESV. MAXIMA			0.085



DURACION 15 MINUTOS			
I	P(x)	F(x)	Desviaciones
56.8	0.02941	0.01085	0.01856
61.6	0.05882	0.03515	0.02368
62.8	0.08824	0.04480	0.04344
64.0	0.11765	0.05610	0.06154
67.6	0.14706	0.10040	0.04666
69.2	0.17647	0.12502	0.05145
71.2	0.20588	0.15973	0.04615
72.0	0.23529	0.17473	0.06057
74.8	0.26471	0.23138	0.03332
77.6	0.29412	0.29286	0.00126
78.4	0.32353	0.31099	0.01254
79.6	0.35294	0.33846	0.01448
80.0	0.38235	0.34766	0.03469
80.0	0.41176	0.34766	0.06410
80.4	0.44118	0.35688	0.08430
82.8	0.47059	0.41212	0.05847
85.6	0.50000	0.47534	0.02466
86.0	0.52941	0.48417	0.04524
88.0	0.55882	0.52737	0.03145
95.2	0.58824	0.66536	0.07712
97.2	0.61765	0.69808	0.08043
100.4	0.64706	0.74521	0.09815
102.8	0.67647	0.77646	0.09999
104.0	0.70588	0.79082	0.08494
105.6	0.73529	0.80874	0.07344
110.0	0.76471	0.85120	0.08649
111.6	0.79412	0.86439	0.07027
115.6	0.82353	0.89278	0.06925
116.8	0.85294	0.90015	0.04721
118.0	0.88235	0.90704	0.02468
118.8	0.91176	0.91138	0.00039
121.6	0.94118	0.92509	0.01608
136.8	0.970588	0.97042	0.00017
DESV. MAXIMA			0.100



DURACION 30 MINUTOS			
I	P(x)	F(x)	Desviaciones
35.4	0.02941	0.03540	0.00599
36.2	0.05882	0.04147	0.01735
38.8	0.08824	0.06599	0.02224
38.8	0.11765	0.06599	0.05165
43.0	0.14706	0.12164	0.02542
43.6	0.17647	0.13115	0.04532
44.0	0.20588	0.13770	0.06819
46.6	0.23529	0.18390	0.05139
48.4	0.26471	0.21912	0.04559
48.6	0.29412	0.22317	0.07095
49.2	0.32353	0.23546	0.08807
53.4	0.35294	0.32599	0.02695
55.4	0.38235	0.37054	0.01181
56.6	0.41176	0.39730	0.01447
58.0	0.44118	0.42831	0.01286
58.6	0.47059	0.44150	0.02909
64.0	0.50000	0.55479	0.05479
64.2	0.52941	0.55875	0.02933
67.0	0.55882	0.61194	0.05312
67.4	0.58824	0.61919	0.03096
68.8	0.61765	0.64384	0.02619
69.2	0.64706	0.65067	0.00361
71.4	0.67647	0.68657	0.01010
71.8	0.70588	0.69279	0.01309
76.0	0.73529	0.75242	0.01712
80.0	0.76471	0.79998	0.03528
85.0	0.79412	0.84809	0.05397
85.8	0.82353	0.85474	0.03121
94.2	0.85294	0.91002	0.05708
96.2	0.88235	0.91988	0.03753
97.0	0.91176	0.92353	0.01176
112.6	0.94118	0.96960	0.02842
113	0.970588	0.970317	0.000272
DESV. MAXIMA			0.088



DURACION 60 MINUTOS			
I	P(x)	F(x)	Desviaciones
19.7	0.02941	0.01696	0.01245
21.8	0.05882	0.03357	0.02525
24.7	0.08824	0.07174	0.01650
24.7	0.11765	0.07174	0.04591
26.0	0.14706	0.09518	0.05188
27.0	0.17647	0.11586	0.06061
27.1	0.20588	0.11805	0.08783
29.7	0.23529	0.18219	0.05310
31.0	0.26471	0.21871	0.04599
31.2	0.29412	0.22455	0.06957
32.4	0.32353	0.26052	0.06301
37.9	0.35294	0.43512	0.08218
38.0	0.38235	0.43828	0.05593
38.4	0.41176	0.45087	0.03910
39.2	0.44118	0.47576	0.03459
40.1	0.47059	0.50324	0.03265
40.2	0.50000	0.50625	0.00625
42.5	0.52941	0.57300	0.04359
44.1	0.55882	0.61615	0.05733
44.3	0.58824	0.62134	0.03310
45.3	0.61765	0.64656	0.02891
45.3	0.64706	0.64656	0.00050
46.8	0.67647	0.68211	0.00564
47.0	0.70588	0.68665	0.01924
48.9	0.73529	0.72726	0.00803
53.0	0.76471	0.80041	0.03570
54.5	0.79412	0.82259	0.02847
55.0	0.82353	0.82948	0.00595
58.6	0.85294	0.87238	0.01944
63.4	0.88235	0.91413	0.03177
71.9	0.91176	0.95816	0.04639
74.4	0.94118	0.96622	0.02504
75.3	0.970588	0.968733	0.001855
DESV. MAXIMA			0.088



DURACION 120 MINUTOS

I	P(x)	F(x)	Desviaciones
11.8	0.02941	0.01564	0.01378
12.6	0.05882	0.02572	0.03311
12.8	0.08824	0.02885	0.05939
15.3	0.11765	0.09248	0.02517
15.8	0.14706	0.11098	0.03608
16.0	0.17647	0.11890	0.05757
16.1	0.20588	0.12297	0.08291
16.7	0.23529	0.14886	0.08643
17.4	0.26471	0.18201	0.08270
20.3	0.29412	0.34188	0.04776
21.1	0.32353	0.38874	0.06521
21.4	0.35294	0.40626	0.05332
22.3	0.38235	0.45822	0.07586
22.8	0.41176	0.48643	0.07467
22.9	0.44118	0.49201	0.05083
23.4	0.47059	0.51947	0.04888
23.7	0.50000	0.53559	0.03559
23.9	0.52941	0.54619	0.01677
24.0	0.55882	0.55143	0.00739
24.3	0.58824	0.56697	0.02127
24.7	0.61765	0.58718	0.03046
24.7	0.64706	0.58718	0.05987
28.0	0.67647	0.73001	0.05354
28.3	0.70588	0.74081	0.03493
29.3	0.73529	0.77428	0.03898
29.4	0.76471	0.77742	0.01271
30.4	0.79412	0.80679	0.01267
32.0	0.82353	0.84672	0.02319
32.1	0.85294	0.84895	0.00399
37.0	0.88235	0.92773	0.04538
39.3	0.91176	0.94933	0.03757
40.3	0.94118	0.95663	0.01546
44	0.970588	0.975711	0.00512
DESV. MAXIMA			0.086



DURACION 360 MINUTOS			
I	P(x)	F(x)	Desviaciones
5.3	0.02941	0.09810	0.06869
6.0	0.05882	0.14949	0.09066
6.0	0.08824	0.14949	0.06125
6.3	0.11765	0.17477	0.05712
6.4	0.14706	0.18358	0.03652
6.6	0.17647	0.20172	0.02525
6.6	0.20588	0.20172	0.00416
7.2	0.23529	0.25964	0.02435
7.3	0.26471	0.26970	0.00500
7.5	0.29412	0.29009	0.00403
7.6	0.32353	0.30039	0.02314
7.8	0.35294	0.32116	0.03178
8.5	0.38235	0.39465	0.01230
8.6	0.41176	0.40513	0.00663
8.7	0.44118	0.41559	0.02559
9.0	0.47059	0.44670	0.02389
9.0	0.50000	0.44670	0.05330
9.5	0.52941	0.49733	0.03208
9.8	0.55882	0.52673	0.03209
9.9	0.58824	0.53634	0.05190
10.4	0.61765	0.58276	0.03489
10.6	0.64706	0.60052	0.04654
10.9	0.67647	0.62623	0.05024
12.0	0.70588	0.71056	0.00467
12.0	0.73529	0.71056	0.02474
12.0	0.76471	0.71056	0.05415
13.0	0.79412	0.77359	0.02053
13.1	0.82353	0.77921	0.04432
13.5	0.85294	0.80051	0.05243
14.1	0.88235	0.82909	0.05326
15.3	0.91176	0.87548	0.03628
20.0	0.94118	0.96592	0.02474
28.2	0.970588	0.99668	0.02609
DESV. MAXIMA			0.091



COMPARACIONES ENTRE DESV. MAXIMA Y EL VALOR CRITICO DE KOLGOMOROV(KV) PARA EL AJUSTE ANALITICO A LA DISTRIBUCION DE GUMBELL TIPO I

DURACION MINUTOS	DESV. MAXIMA DM	KV	OBSV.
5	0.160	0.231	SAJ
10	0.085	0.231	SAJ
15	0.100	0.231	SAJ
30	0.088	0.231	SAJ
60	0.088	0.231	SAJ
120	0.086	0.231	SAJ
360	0.091	0.231	SAJ

SE ACEPTA EL AJUSTE (SAJ), SI $DM < KV$, CON UN NIVEL DE SIGNIFICACION DE 0.05

*NO SE ACEPTA EL AJUSTE (SAJ), SI $DM > KV$

INTENSIDADES DE LLUVIA PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO Y OBTENIDAS A TRAVES DEL AJUSTE ANALITICO

	5	10	15	30	60	120	360
1.5 años	135.0	100.5	79.4	53.7	34.7	20.2	7.9
2 años	152.1	109.1	86.7	61.3	40.0	23.0	9.5
5 años	194.2	130.5	104.8	80.0	53.0	30.2	13.5
10 años	222.1	144.6	116.8	92.4	61.6	34.9	16.1
15 años	237.8	152.5	123.5	99.3	66.4	37.5	17.6
25 años	257.3	162.4	131.9	108.0	72.4	40.8	19.4
50 años	283.4	175.7	143.1	119.6	80.5	45.2	21.9
100años	309.3	188.8	154.3	131.1	88.5	49.6	24.3

PARAMETROS DE LAS ECUACIONES DE LA FORMA:

$$I = A/(t+d)^b$$

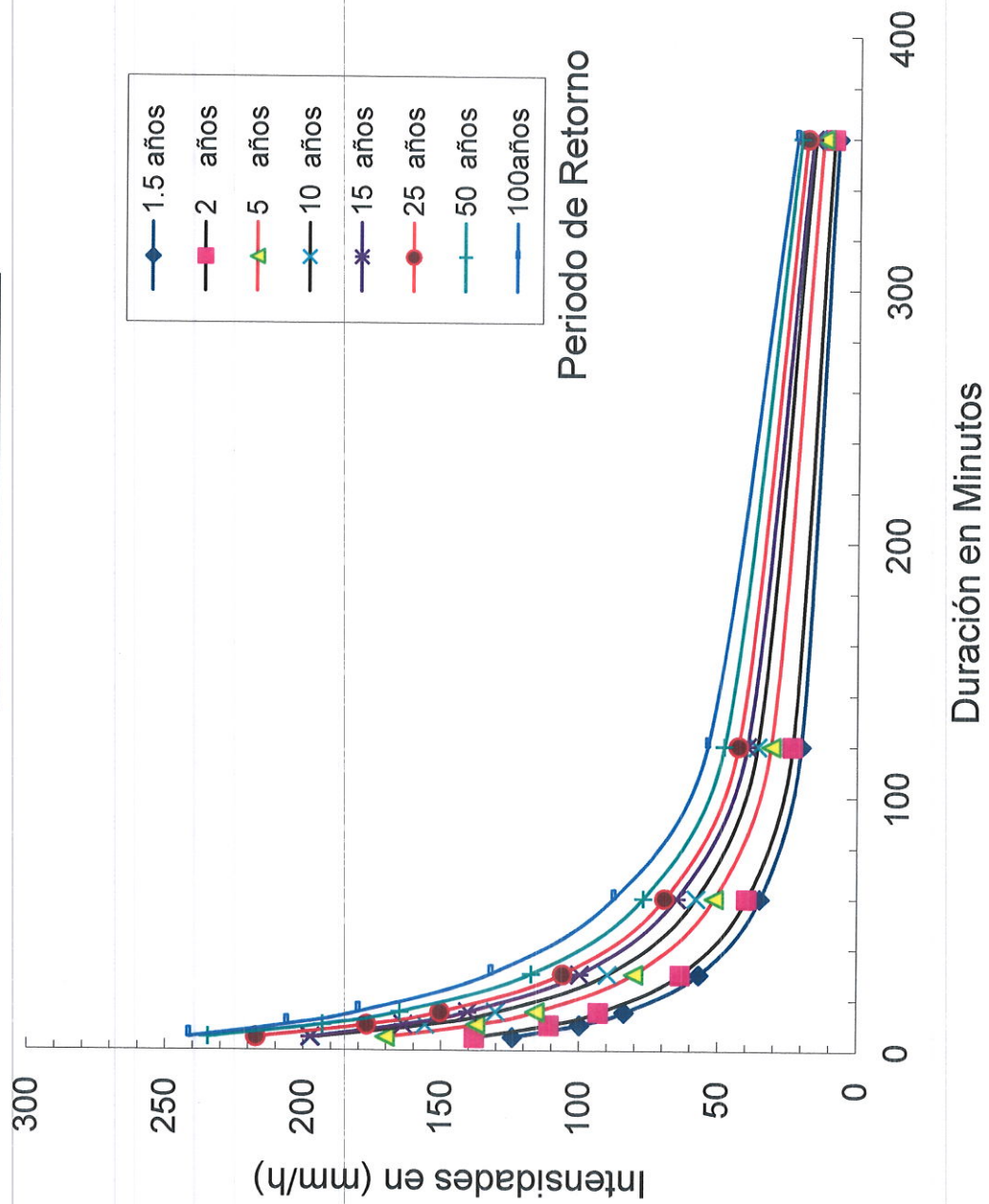
T: Años	r	A	d	b
1.5	-0.999	1932.1	14	0.932
2	-0.998	1802.9	13	0.890
5	-0.997	1789.9	12	0.830
10	-0.996	1493.0	9	0.767
15	-0.993	2459.7	15	0.842
25	-0.994	2050.4	12	0.792
50	-0.992	2335.0	13	0.795
100	-0.988	3984.0	20	0.871

INTENSIDADES (mm/h) OBTENIDAS DE LAS ECUACIONES ESTACION: MUY MUY

Periodo	Tiempo en Minuto						
Retorno (Tr)	5	10	15	30	60	120	360
1.5 años	124.2	99.9	83.7	56.8	35.0	20.1	7.7
2 años	137.8	110.8	93.0	63.5	39.7	23.3	9.3
5 años	170.3	137.5	116.0	80.4	51.4	31.1	13.1
10 años	197.1	155.9	130.3	89.8	58.0	35.9	16.0
15 años	197.5	163.7	140.4	99.8	64.9	39.6	16.8
25 años	217.1	177.0	150.5	106.0	69.2	42.8	18.8
50 años	234.5	193.0	165.0	117.3	77.0	47.8	21.1
100años	241.5	206.0	180.1	132.0	87.7	53.9	22.6



Curvas IDF en Muy Muy
Período: 1982 -2014



INSTITUTO NICARAGÜENSE DE ESTUDIOS TERRITORIALES
DIRECCIÓN GENERAL DE METEOROLOGÍA
RESUMEN METEOROLÓGICO ANUAL

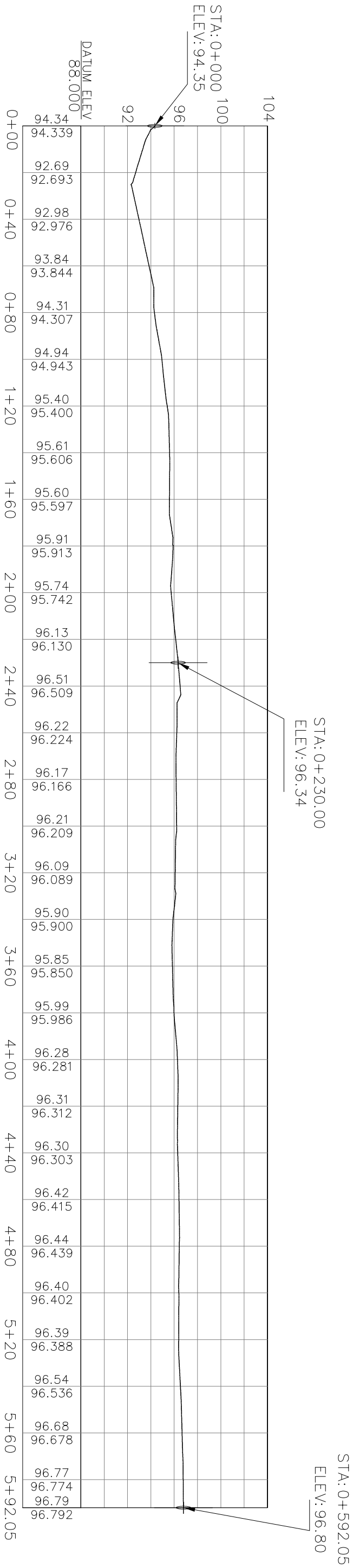
Estación: **MUY MUY / MATAGALPA** Código: **55027**
 Departamento: **MATAGALPA** Municipio: **MUY MUY**
 Latitud: **12°45'48"** Longitud: **85°37'36"**
 Años: **2005-2014** Elevación: **320 msnm**
 Parámetro: **Precipitación (mm)** Tipo: **HMP**

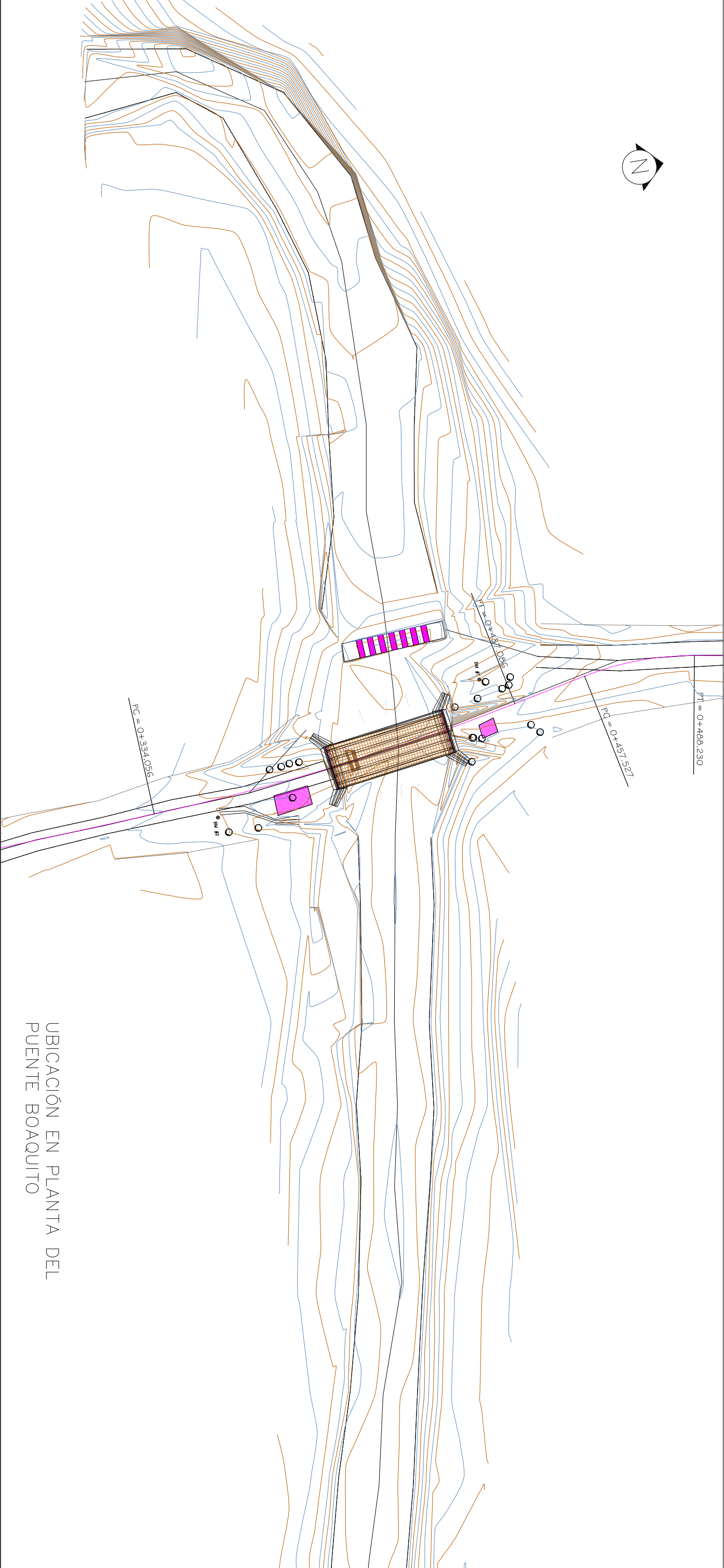
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Suma
2005	24.3	0.2	2.4	72.3	197.1	419.3	211.5	180.7	201.8	247.6	82.3	46.9	1,686.4
2006	62.1	5.9	17.2	4.4	130.9	114.9	279.8	166.4	125.5	114.9	85.7	85.9	1,193.6
2007	27.2	6.2	30.5	27.4	32.7	147.2	234.1	301.8	253.2	275.9	128.9	50.0	1,515.1
2008	40.5	31.7	43.1	38.1	96.0	356.5	398.7	210.0	140.2	299.1	9.0	42.6	1,705.5
2009	33.3	30.2	5.7	14.0	232.5	71.8	269.6	159.6	77.6	156.2	92.1	50.4	1,193.0
2010	25.2	9.7	1.1	143.0	310.8	202.1	309.4	417.1	291.8	81.3	71.5	16.9	1,879.9
2011	29.4	12.6	13.2	12.8	139.6	298.7	368.4	99.3	170.6	105.5	69.0	146.0	1,465.1
2012	106.5	27.5	10.2	35.1	166.4	208.0	304.9	331.7	185.6	190.8	51.8	32.7	1,651.2
2013	52.5	25.9	1.0	10.4	163.3	286.1	219.4	215.5	279.2	191.0	105.7	149.6	1,699.6
2014	43.4	34.8	2.0	3.5	188.6	247.6	95.1	144.2	152.9	242.6	99.1	16.7	1,270.5
Suma	444.4	184.7	126.4	361.0	1,657.9	2,352.2	2,690.9	2,226.3	1,878.4	1,904.9	795.1	637.7	15,259.9
Media	44.4	18.5	12.6	36.1	165.8	235.2	269.1	222.6	187.8	190.5	79.5	63.8	1,526.0
Max	106.5	34.8	43.1	143.0	310.8	419.3	398.7	417.1	291.8	299.1	128.9	149.6	1,879.9
Min	24.3	5.9	1.0	3.5	32.7	71.8	95.1	99.3	77.6	81.3	9.0	16.7	1,193.0



ANEXO B:
Planos Topográficos

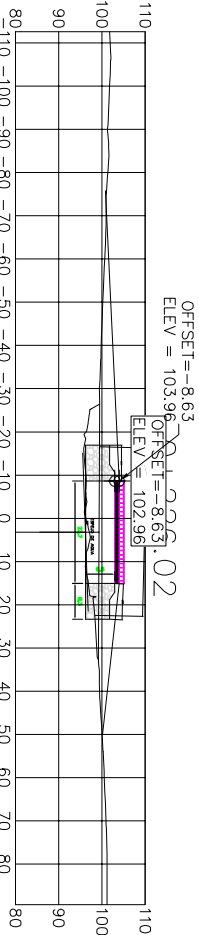
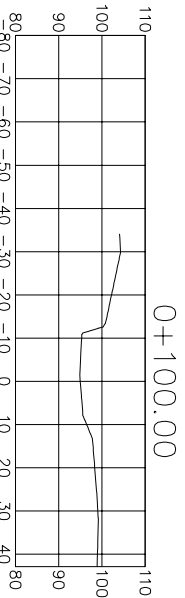
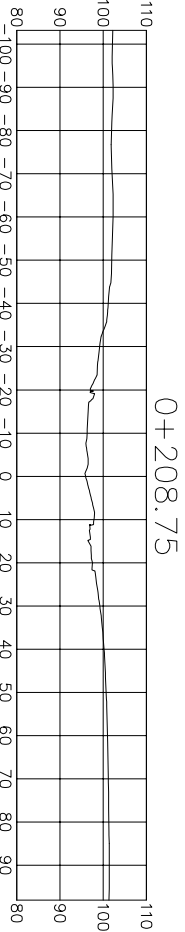
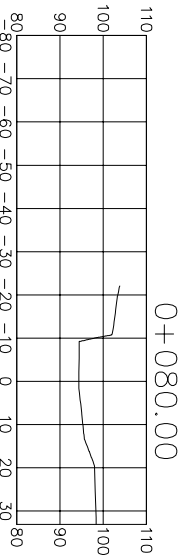
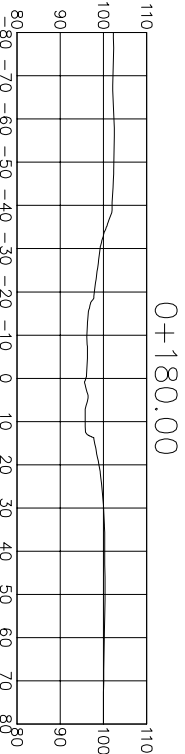
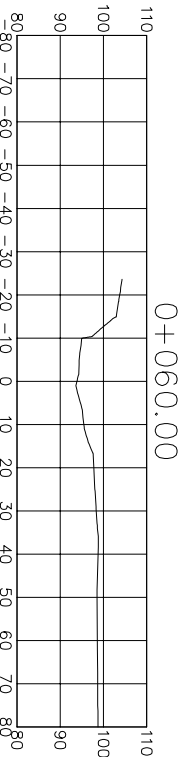
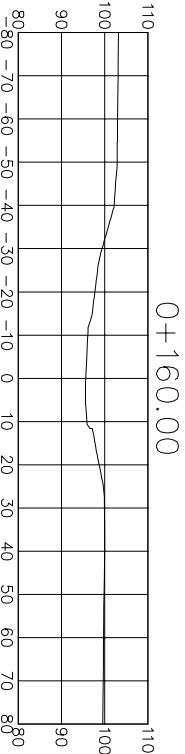
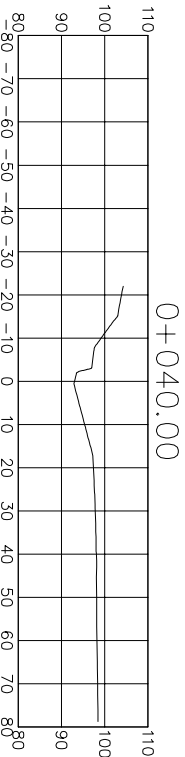
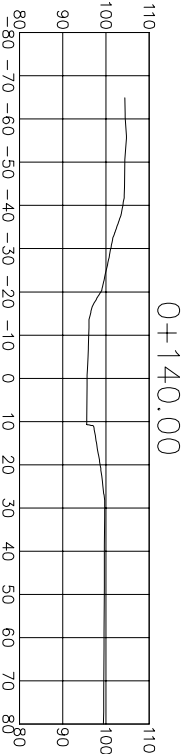
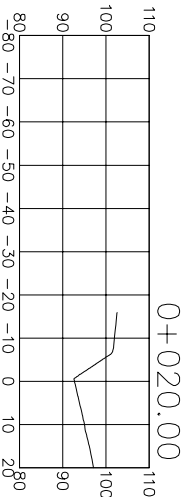
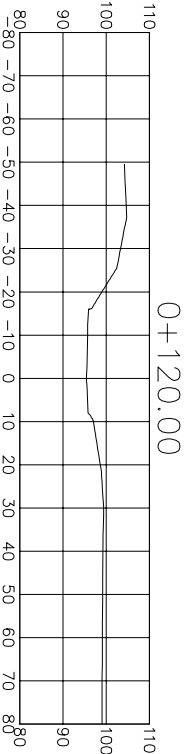
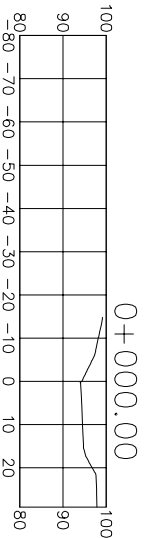
PERFIL LONGITUDINAL DE EJE DEL RIO



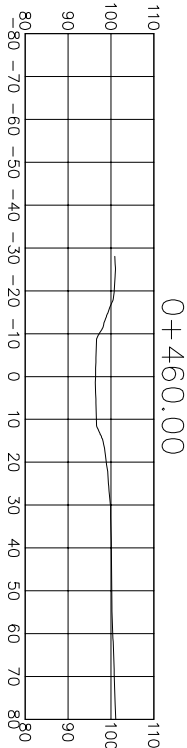
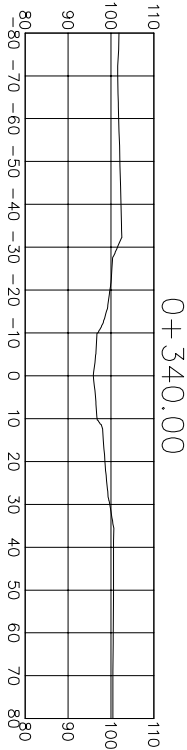
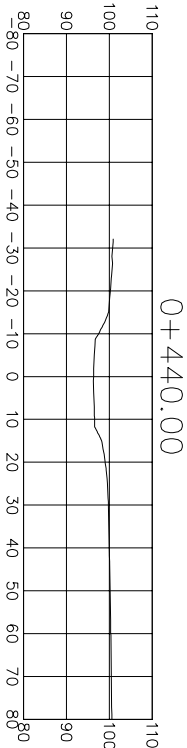
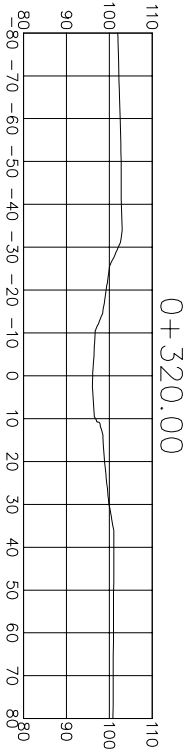
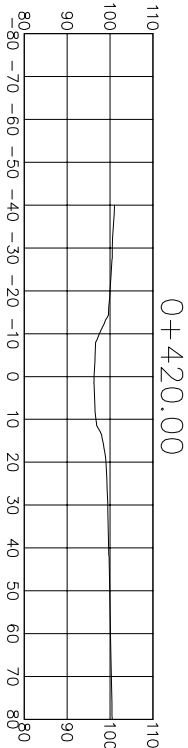
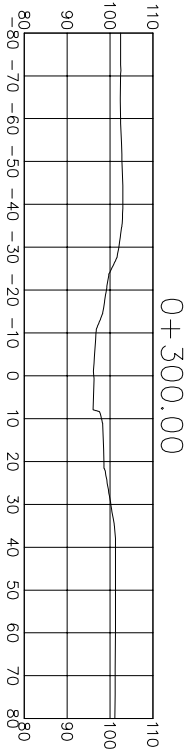
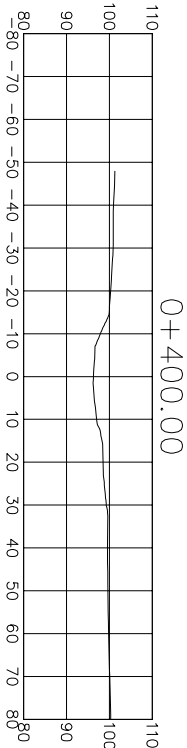
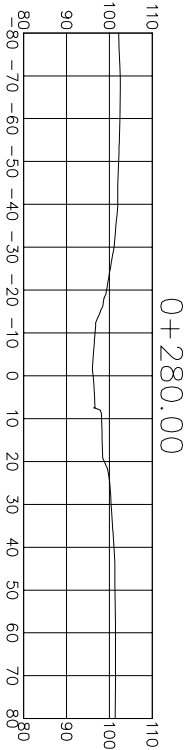
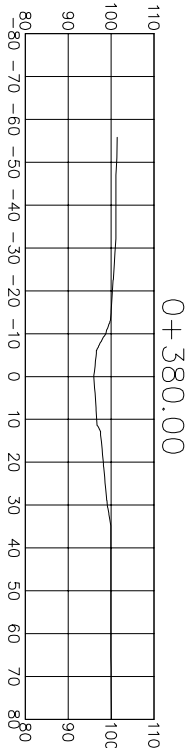
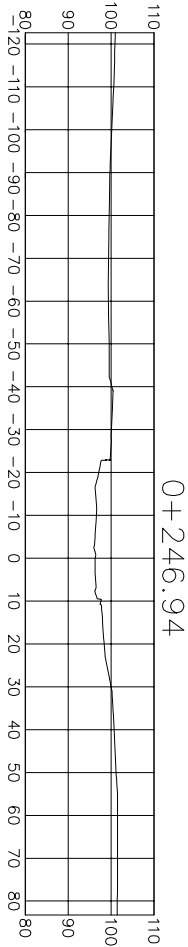
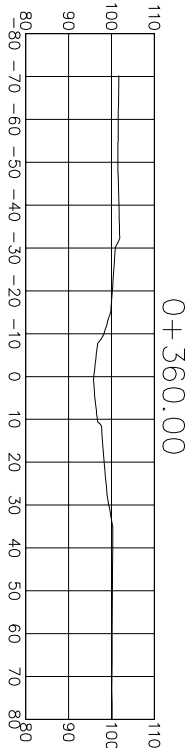
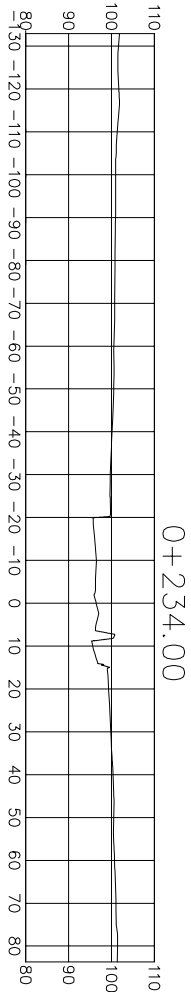


UBICACIÓN EN PLANTA DEL
PUENTE BOAQUITO

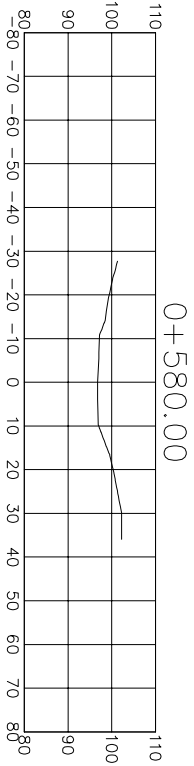
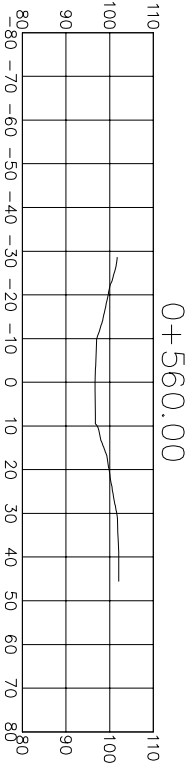
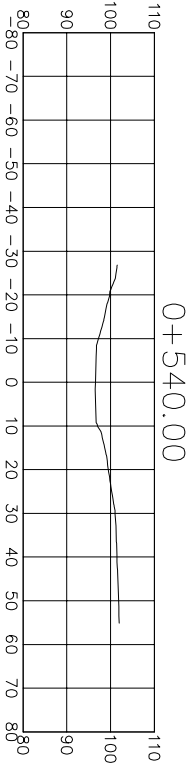
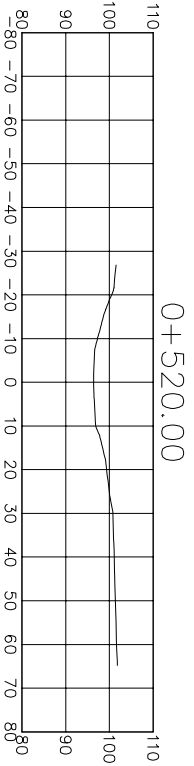
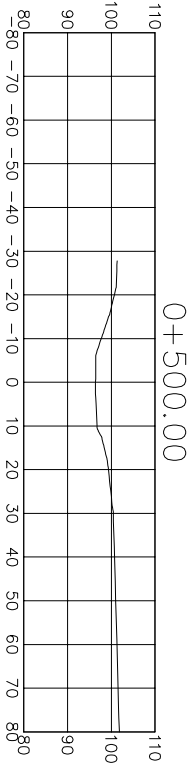
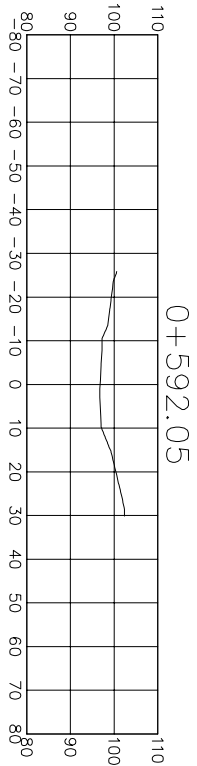
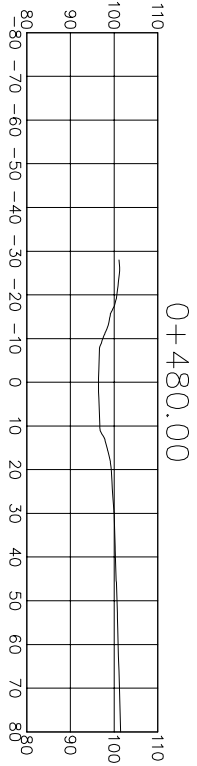
SECCIONES TRANSVERSALES DEL RIO



SECCIONES TRANSVERSALES DEL RIO



SECCIONES TRANSVERSALES DEL RIO



ANEXO C:

Determinación del D50

“PROYECTO PUENTE BOAQUITO”
MANAGUA, NICARAGUA

ORIGINAL

RESULTADOS LABORATORIO GEOTÉCNICO

PRESENTADA A: ERICK M. RIVAS ALBUQUERQUE

PRESENTADA POR: EMPRESA DE GEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

MANAGUA, ENERO DE 2016



Managua, 12 de Enero de 2016

Sr. Erick M. Rivas Albuquerque
Sus manos
Managua

*Ref: Resultados de laboratorio de muestra de suelo. Proyecto Puente
Boaquito.*

Estimado Señor:

Con sumo agrado le remito el Informe de los Resultados de Laboratorio Geotécnico de la Muestra 1.

Confiando haber cumplido con los requerimientos técnicos, le solicito la cancelación de los servicios correspondientes.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle

Respetuosamente,

MSc. Gerardo Silva Velásquez
Ingeniero Geólogo
Lic. MTI. 7781

cc: Expediente



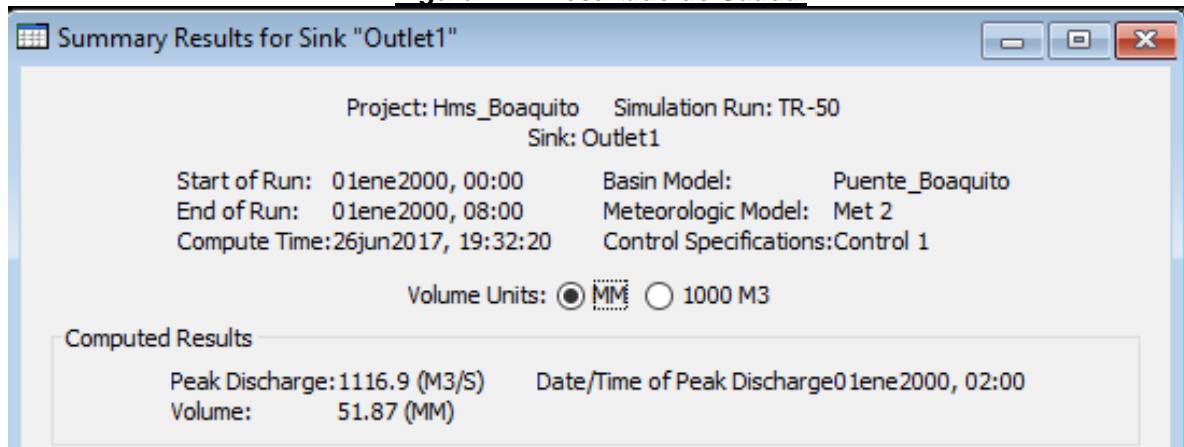
Cliente:	Erick Mauricio Rivas Albuquerque										Proyecto:	Puente Boaquito			
Puente:	Boaquito										Coordenadas:	635,872 E - 1375,960 N			
Sondeo:	Muestra 1										Fecha:	Enero, 2016			
RESULTADO DE ENSAYOS DE SUELOS															
Muestra	Profundidad en pie	Muestra No.	RQD %	% que pasa por tamiz				L.L %	IP %	Clasif. SUCS	% Partículas			Litología	Diámetro medio (D ₅₀ mm)
				No. 4	No. 10	No. 40	No. 200				G	S	F		
1	0'0" - 1'6"	1	-	57	49	43	37	46	25	GC	43	20	37	Grava arcillosa amarillenta.	2.93
	1'6" - 9'0"	2	-	100	99	98	94	65	34	CH	0	6	94	Arcilla arenosa rojiza clara.	
	9'0" - 14'0"	-	60.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Roca fracturada color gris.	
	14'0" - 20'0"	-	89.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Roca color gris.	

ANEXO D:

**Imágenes de Resultados en HEC-HMS 4.2 y HEC-RAS 5.0.3 de
Evaluación Hidrotécnica del Puente Boaquito para períodos de
retorno de 25 y 50 años**

Período de Retorno de 50 años

Figura D-1: Resultado de Caudal



Caudal: 1116.9 m³/s

Figura D-2: Perfil de Río

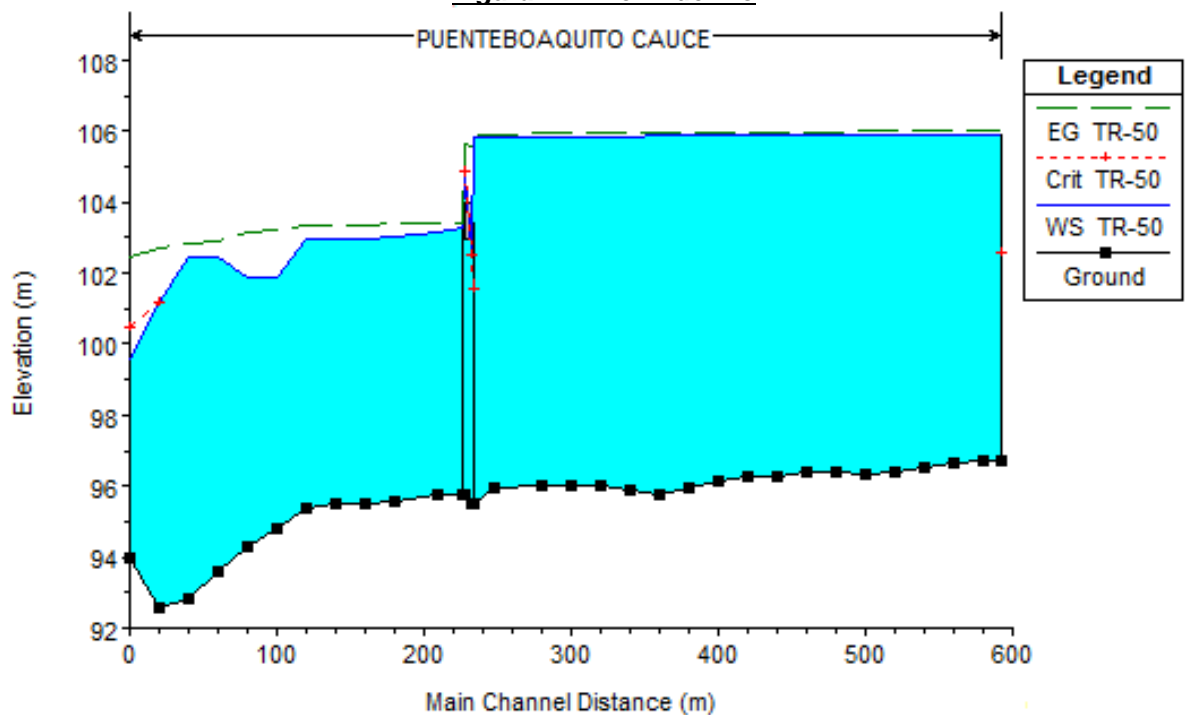
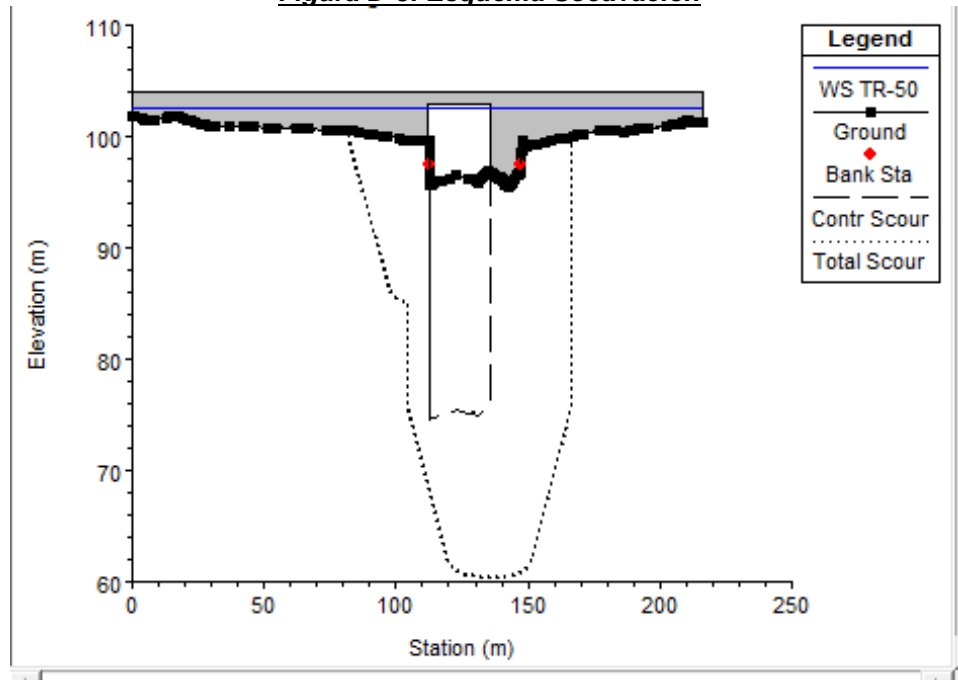


Figura D-3: Esquema Socavación



Socavación Total estribo izquierdo: 14.80m

Socavación Total estribo derecho: 36.58m

Período de Retorno de 25 años

Figura D-4: Resultado de Caudal

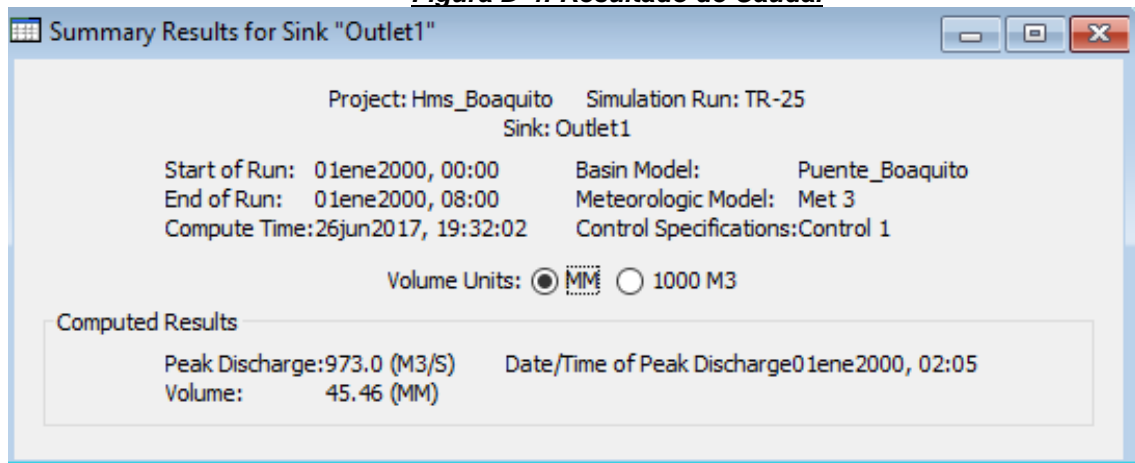


Figura D-5: Perfil de Río

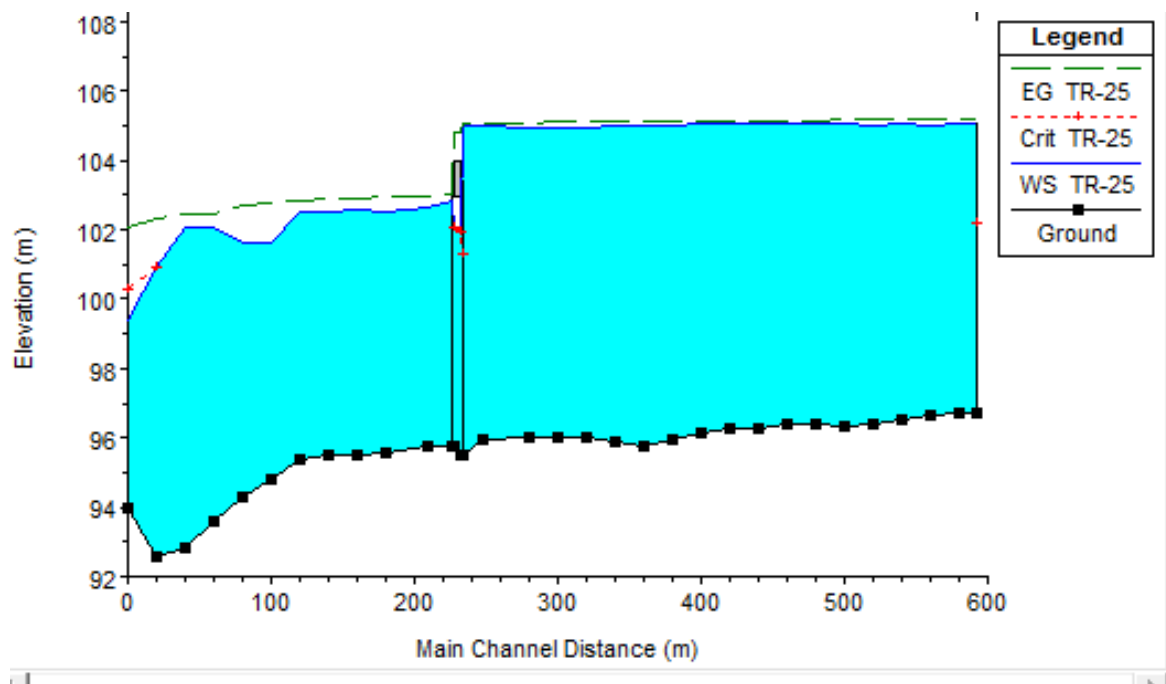
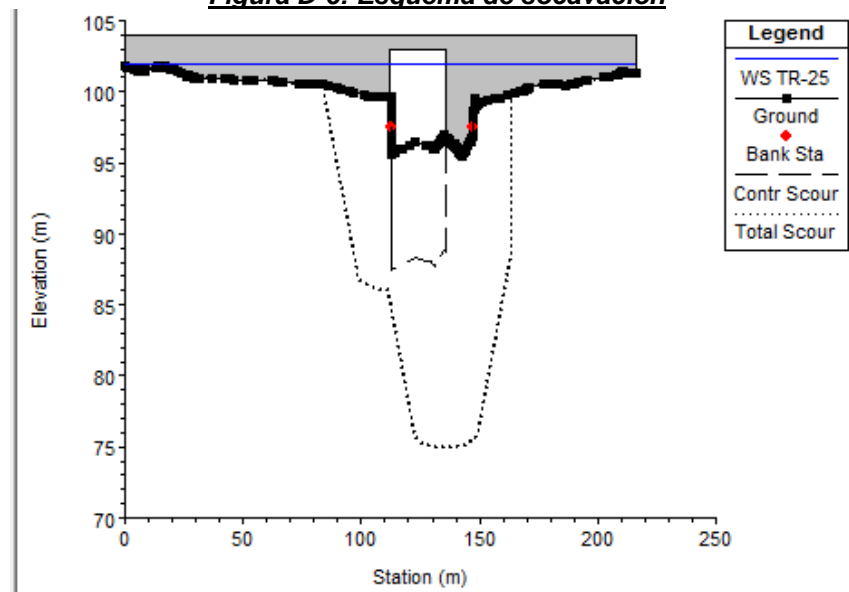


Figura D-6: Esquema de socavación



Socavación Total estribo izquierdo: 13.71m

Socavación Total estribo derecho: 22.01m